

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALUÍZIO CARLOS WANDERLEY GROCHOCKI

**DEFINIÇÃO DE UM MODELO ESPAÇO-TEMPORAL
DE REDES DE DRENAGEM**

Curitiba
2008

ALUÍZIO CARLOS WANDERLEY GROCHOCKI

DEFINIÇÃO DE UM MODELO ESPAÇO-TEMPORAL DE REDES DE DRENAGEM

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Antônio José Berutti Vieira

Curitiba
2008

À Mônica, minha esposa e amiga.
Aos meus filhos Pedro, Bernardo, Marina e Tiago.
Pelo amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais (*in memorian*) pelo exemplo de vida e dedicação. Mesmo na ausência deles, seus ensinamentos continuam presentes norteando minha vida.

Ao meu irmão Luiz Henrique pela amizade e dedicação de todas as horas, sempre me auxiliando nesta e em outras empreitadas.

À minha família pelo amor, compreensão, apoio e incentivo recebidos ao longo de todo este tempo.

Aos amigos e professores João Fernando (JF) Custódio da Silva, da UNESP de Presidente Prudente e Vólvi Zambenedetti, do LACTEC, pelo incentivo na realização deste Curso.

Ao meu orientador, professor Antônio José Berutti Vieira, pela oportunidade, ajuda e discussões valiosas durante o Curso e ao longo deste trabalho.

À professora Cláudia Robbi Sluter, ao professor Henrique Firkowski e ao professor Jorge Antônio Silva Centeno pela amizade, paciência e dedicação nas explicações às dúvidas em aulas e nos trabalhos das disciplinas.

Aos professores membros da banca do Seminário, professor Hélio Pedrini, do Departamento de Informática da UFPR, professor Quintino Dalmolin e professora Luciene Stamato Delazari, pelo tempo dispendido e pelas valiosas sugestões.

A todos os colegas do Curso, obrigado pela amizade e colaboração. Em especial, ao colega de trabalho, analista de sistemas Luiz Dias Pereira, pelo auxílio e sugestões nos códigos da interface gráfica e leitura de arquivos do protótipo.

Ao Tribunal de Justiça do Paraná, pela possibilidade de compensar os horários de aulas e reuniões, que me deixaram ausente do meu local de trabalho.

À Coordenação do CPGCG da UFPR, pela oportunidade conferida e à secretária do Curso, sra. Mônica, pela atenção recebida.

RESUMO

Redes de drenagem são fenômenos terrestres estudados em ciências como Cartografia, Hidrologia, Florestal, Geologia e Geografia. Em Hidrologia, redes de drenagem, juntamente com outros elementos como forma, relevo, tipo de solo e cobertura vegetal, desempenham importante papel no estudo do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica e formam a base na qual a morfologia e paisagens são caracterizadas ao longo do tempo. Em Geologia, muitas conclusões geológicas são fundamentadas em inferências derivadas das redes de drenagem. Em Cartografia, quase todos os mapas representam-nas como um fenômeno terrestre de referência. Dados advindos desta referência descrevem, em geral, a estrutura e relacionamentos espaciais do fenômeno em instantes distintos do tempo, caracterizados pela geometria e topologia, além da semântica definida pelo observador. Estes dados, quando estruturados adequadamente num modelo de dados, formam o que é visto como núcleo conceitual do sistema de informação. É possível expressar este modelo de dados num modelo correspondente de classes de objetos, conferindo maior poder de abstração e melhor aproximação semântica com o fenômeno investigado. Assim, além de capturar atributos geométricos e topológicos do fenômeno, é possível definir operadores que modelam comportamento de objetos. Este modelo de classes também pode ser estendido para expressar novos fenômenos especializados ou advindos de uma combinação entre eles, muito comuns em estudos que envolvam múltiplas disciplinas. A falta de um modelo próprio de classes de objetos que formalize redes de drenagem foi a motivação deste trabalho. Partindo-se do princípio de que redes de drenagem podem ser formadas por redes de pontos e linhas, representadas por meio de grafos, neste trabalho utilizou-se a UML (*Unified Modeling Language*) para expressar estes fenômenos terrestres. Uma metodologia é proposta para a construção do modelo que resultou numa estrutura de dez classes de objetos: *RedeDeDrenagem*, *Canal*, *TrechoDeCanal*, *No*, *Polilinha*, *PontoTopografico*, *TipoRede*, *TipoFenomenoTerrestre*, *TipoOrdenamento* e *REM*. Um protótipo de software foi desenvolvido que utiliza o modelo proposto e alguns operadores de classes foram implementados. Um conjunto de experimentos com dados de três redes de drenagem foi conduzido, apresentando resultados que confirmaram o modelo ser adequado segundo os objetivos e premissas estabelecidos. Uma análise dos resultados é discutida e recomendações são sugeridas para prosseguimento desta pesquisa.

Palavras-chave: Fenômeno terrestre. Rede de drenagem. Modelagem. UML. Classe. Objeto.

ABSTRACT

Drainage networks are earth's phenomena studied in sciences like Cartography, Hydrology, Forest, Geology and Geography. Among other geomorphic elements as form, relief, soil type and vegetation coverage, drainage networks play an important role in the study of hydrologic behavior of a hydrographical basin and are the basis for characterizing morphology and landscape patterns along the time. Many geological conclusions are based on inferences drawn from drainage networks. In Cartography, almost all the maps represent them as terrestrial phenomenon of reference. In general, drainage networks data describe them as a spatial structure and relationship in distinct instants of the time, featured by the geometry, topology and semantic observer's view. When adequately structured in a data model, these data form what is understood as a conceptual core of the information system. It is possible to express this model in a corresponding object class model, providing better abstraction power and better semantic approach with the investigated phenomenon. Thus, beyond capturing phenomenon geometric and topological attributes, it is possible to define operators that model object behaviors, extending the classes to express new specialized phenomena or a combination of them, very common when carrying out multidisciplinary studies. The lack of an object class model that formalizes a pattern for draining networks was the motivation of this work. Knowing that draining networks can be built by sets of points and lines, represented by graphs, this work uses the UML (Unified Modeling Language) to formalize a pattern for these terrestrial phenomena. A methodology is proposed for the construction of a model which resulted in a structure of ten object classes: *RedeDeDrenagem*, *Canal*, *TrechoDeCanal*, *No*, *Polilinha*, *PontoTopografico*, *TipoRede*, *TipoFenomenoTerrestre*, *TipoOrdenamento* e *REM*. A software prototype was built to apply the proposed model and some class operators had been developed. A set of data experiments with three drainage networks was conducted, presenting results that had confirmed the model being suited and in accordance with the objectives and established premises. An analysis of the results is discussed and recommendations suggested for further works.

Key words: Earth's phenomena. Drainage networks. Modeling. UML. Classes. Objects.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - EXEMPLO DE REDE DE DRENAGEM	12
FIGURA 2 - VISÃO GERAL SOBRE ESTRATÉGIA DE DESENVOLVIMENTO DO SNIRH.....	15
FIGURA 3 - DIAGRAMA DE ETAPAS DO PROCESSO DE ESTUDO DE UM FATO.....	19
FIGURA 4 - EXEMPLO DE DIAGRAMA DE GRAFO	26
FIGURA 5 - GRAFO PLANAR E NÃO-PLANAR	26
FIGURA 6 - GRAFO, MATRIZ DE INCIDÊNCIA E MATRIZ DE ADJACÊNCIA	28
FIGURA 7 - LISTA DE ADJACÊNCIA PARA CADA NÓ (GRAFOS ESPARSOS): (a) GRAFO ORIENTADO; (b) GRAFO NÃO-ORIENTADO	29
FIGURA 8 - EXEMPLO DE POLILINHAS	30
FIGURA 9 - VISUALIZAÇÃO DE UMA POLILINHA NO SOFTWARE ArcMap®	31
FIGURA 10 - INTERSEÇÃO DE REMs (a) REMs DISJUNTOS (b)	32
FIGURA 11 - USO DE REMS DE POLILINHAS PARA A DETERMINAÇÃO DE INTERSEÇÕES	33
FIGURA 12 - ESTRUTURA TEMPORAL.....	35
FIGURA 13 - DIAGRAMA DE CLASSES DE OBJETOS PARA FENOMENOS TERRESTRES	38
FIGURA 14 - AS ESPECIALIZAÇÕES DA CLASSE <i>FenomenoTerrestre</i>	39
FIGURA 15 - CLASSE <i>AreaLevantamento</i> E FENÔMENOS TERRESTRES LEVANTADOS	39
FIGURA 16 - ÁREAS DE LEVANTAMENTO COM O PASSAR DO TEMPO	40
FIGURA 17 - MEMBROS DA CLASSE <i>Recobrimento</i> E DA CLASSE <i>AreaLevantamento</i>	40
FIGURA 18 - ELEMENTOS DE REDE DE DRENAGEM	42
FIGURA 19 - PADRÕES DE DRENAGEM	44
FIGURA 20 - MÉTODOS DE ORDENAMENTO HIDROLÓGICO	48
FIGURA 21 - AS CINCO VISÕES DE UM SISTEMA DE SOFTWARE.....	54
FIGURA 22 - DIAGRAMAS DA UML	56
FIGURA 23 - EXEMPLO DE DIAGRAMA DE CASOS DE USO	58
FIGURA 24 - EXEMPLO DE UM DIAGRAMA DE CLASSES	59
FIGURA 25 - EXEMPLO DE CLASSE EM UML.....	60
FIGURA 26 - EXEMPLO DE DIAGRAMA DE ATIVIDADES	62
FIGURA 27 - TIPOS DE MULTIPLICIDADE	65
FIGURA 28 - TIPOS DE ASSOCIAÇÕES: (a) SIMPLES; (b) POR COMPOSIÇÃO	66
FIGURA 29 - EXEMPLO DE GENERALIZAÇÃO	66
FIGURA 30 - EXEMPLOS DE DEFINIÇÕES DE LISTAS	68
FIGURA 31 - EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS GRÁFICOS DA BIBLIOTECA AWT	69
FIGURA 32 - EXEMPLO DE PARTE DE ARQUIVO DE DADOS DE REDE DE DRENAGEM	73
FIGURA 33 - LOCALIZAÇÃO (a) E BACIA HIDROGRÁFICA (b) DA REDE DE DRENAGEM Nº 1 ...	74
FIGURA 34 - LOCALIZAÇÃO (a) E BACIA HIDROGRÁFICA (b) DA REDE DE DRENAGEM Nº 2 ...	75
FIGURA 35 - LOCALIZAÇÃO (a) E BACIA HIDROGRÁFICA (b) DA REDE DE DRENAGEM Nº 3 ...	75
FIGURA 36 - DIAGRAMA DE ATIVIDADES DO TRABALHO REALIZADO	78
FIGURA 37 - DIAGRAMA DE CASO DE USO GERAL “REDE DE DRENAGEM”	79
FIGURA 38 - ERROS COMUNS ENCONTRADOS EM POLILINHAS DIGITALIZADAS.....	81
FIGURA 39 - MODELO DE CLASSES DE OBJETOS PROPOSTO	90
FIGURA 40 - CLASSE <i>Recobrimento</i>	93
FIGURA 41 - CLASSE <i>AreaLevantamento</i>	93
FIGURA 42 - CLASSE <i>FenomenoTerrestre</i>	94
FIGURA 43 - CLASSE <i>RedeDeDrenagem</i>	94
FIGURA 44 - CLASSE <i>TrechoDeCanal</i>	95
FIGURA 45 - CLASSE <i>Canal</i>	95
FIGURA 46 - PACOTES (<i>Packages</i>) DAS CLASSES DO PROTÓTIPO	98
FIGURA 47 - JANELA PRINCIPAL E JANELA DA REDE DE DRENAGEM DO PROTÓTIPO	99
FIGURA 48 - DIÁLOGO DE PROCURA DO ARQUIVO DE DADOS DE ENTRADA.....	99
FIGURA 49 - RETÂNGULOS ENVOLVENTES MÍNIMOS DOS TRECHOS DE CANAIS	100
FIGURA 50 - VISUALIZAÇÃO DA REDE E CURVAS DE NÍVEIS.....	101
FIGURA 51 - EXPLORADOR DOS MÉTODOS DOS OBJETOS DA REDE.....	102
FIGURA 52 - ROLAGEM DA TELA DA FIGURA ANTERIOR	102
FIGURA 53 - REDE Nº 1 E SEUS ELEMENTOS VISUALIZADOS NO PROTÓTIPO.....	105
FIGURA 54 - REDE Nº 2 E SEUS ELEMENTOS VISUALIZADOS NO PROTÓTIPO.....	108
FIGURA 55 - REDE Nº 3 E SEUS ELEMENTOS VISUALIZADOS NO PROTÓTIPO.....	111

FIGURA 56 - ORDENAMENTO DE STRAHLER PARA A REDE Nº 1	117
FIGURA 57 - ORDENAMENTO DE STRAHLER PARA A REDE Nº 2	117
FIGURA 58 - ORDENAMENTO DE STRAHLER PARA A REDE Nº 3	118
FIGURA 59 - SÉRIE TEMPORAL DE LEVANTAMENTOS PARA UMA MESMA REGIÃO.....	119
FIGURA 60 - REDE Nº 1 VISUALIZADA NO GOOGLE EARTH® (TOPO)	120
FIGURA 61 - REDE Nº 1 VISUALIZADA NO GOOGLE EARTH® (PERSPECTIVA)	120
FIGURA 62 - REDE Nº 2 VISUALIZADA NO GOOGLE EARTH® (TOPO)	121
FIGURA 63 - REDE Nº 2 VISUALIZADA NO GOOGLE EARTH® (PERSPECTIVA)	121
FIGURA 64 - REDE Nº 3 VISUALIZADA NO GOOGLE EARTH® (TOPO)	122
FIGURA 65 - REDE Nº 3 VISUALIZADA NO GOOGLE EARTH® (PERSPECTIVA)	122
FIGURA 66 - CAIXA DE SELEÇÃO DE EXTENSÕES DO ArcGIS®	140
FIGURA 67 - MENU ARCTOOLBOX DO ArcMAP®	141
FIGURA 68 - <i>LAYER</i> DA GRADE DE PONTOS PARA O PROCESSO	142
FIGURA 69 - TABELA DE ATRIBUTOS DOS PONTOS DO MODELO	143
FIGURA 70 - MENU DE INVOCÇÃO DE FUNÇÕES GERAIS SOBRE DADOS	143
FIGURA 71 - JANELA DOS RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS DADOS.....	144
FIGURA 72 - VISUALIZAÇÃO DE PARTE DAS PROPRIEDADES DA <i>LAYER</i> DE PONTOS.....	145
FIGURA 73 - CRIAÇÃO DA TIN INICIAL VAZIA	146
FIGURA 74 - PROPRIEDADE DA REFERÊNCIA ESPACIAL	147
FIGURA 75 - PESQUISA PELO SISTEMA DE COORDENADAS	147
FIGURA 76 - SISTEMAS DE COORDENADAS	148
FIGURA 77 - SELEÇÃO DO MERIDIANO.....	148
FIGURA 78 - APRESENTAÇÃO DO SISTEMA SELECIONADO	149
FIGURA 79 - RETORNO A CAIXA DE DIÁLOGO INICIAL	149
FIGURA 80 - PARÂMETROS PARA A EDIÇÃO DA TIN	150
FIGURA 81 - VISUALIZAÇÃO DA TIN PRODUZIDA	151
FIGURA 82 - RAMPA DE CORES PARA OS VALORES DE ALTITUDES.....	151
FIGURA 83 - <i>LAYER</i> APÓS APLICAÇÃO DA CLASSE DE CORES.....	152
FIGURA 84 - AJUSTE DE DEPRESSÕES POR CORTES (SUPRESSÕES) ADJACENTES.....	153
FIGURA 85 - AJUSTE DE DEPRESSÕES POR PREENCHIMENTOS ADJACENTES.....	153
FIGURA 86 - JANELA DE DIÁLOGO PARA A GERAÇÃO DA IMAGEM RASTER.....	153
FIGURA 87 - IMAGEM RASTER CRIADA A PARTIR DA TIN	154
FIGURA 88 - DIÁLOGO PARA PREENCHIMENTO DAS DEPRESSÕES	154
FIGURA 89 - VALORES DOS SENTIDOS EM RELAÇÃO A CÉLULA CENTRAL	155
FIGURA 90 - VALOR AFIXADO APÓS ANÁLISE	155
FIGURA 91 - JANELA DE DIÁLOGO "FLOW DIRECTION".....	156
FIGURA 92 - <i>LAYER</i> DOS SENTIDOS DE FLUXO DETERMINADOS	156
FIGURA 93 - JANELA DE DIÁLOGO DO "FLOW ACCUMULATION	157
FIGURA 94 - <i>LAYER</i> REPRESENTANDO A CONTRIBUIÇÃO OBTIDA.....	158
FIGURA 95 - <i>LAYER</i> MODIFICADA REPRESENTANDO A CONTRIBUIÇÃO OBTIDA.....	158
FIGURA 96 - SOBREPOSIÇÃO DE <i>LAYERS</i>	159
FIGURA 97 - DIÁLOGO PARA DELIMITAÇÃO E PRODUÇÃO DO ARQUIVO "STREAM".....	160
FIGURA 98 - IMAGEM OBTIDA DO ARQUIVO "STREAM" GERADO NO ARCGIS®	160
FIGURA 99 - DIÁLOGO DE PASSAGEM PARA ARQUIVO "FEATURE".....	161
FIGURA 100 - IMAGEM OBTIDA VETORIZADA	161
FIGURA 101 - RESULTADO DA VETORIZAÇÃO COM POLILINHA SELECIONADA	162
FIGURA 102 - VALORES DOS NÓS DA POLILINHA SELECIONADA	162
FIGURA 103 - MENU DO ARCTOOLBOX PARA EXPORTAÇÃO EM ARQUIVOS DE TEXTOS	163
FIGURA 104 - EXEMPLO DE ARQUIVO DE DADOS EXPORTADO.....	163

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS ESPAÇO-TEMPORAIS PARA SIG	23
TABELA 2 - INTERVALOS DE DECLIVIDADE DO TERRENO	46
TABELA 3 - COMPONENTES PRINCIPAIS DA BIBLIOTECA SWING	70
TABELA 4 - RESUMO DOS RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS.....	104
TABELA 5 - LEITURAS OBTIDAS PARA A REDE DE DRENAGEM Nº 1.....	114
TABELA 6 - LEITURAS OBTIDAS PARA A REDE DE DRENAGEM Nº 2.....	115
TABELA 7 - LEITURAS OBTIDAS PARA A REDE DE DRENAGEM Nº 3.....	115

LISTA DE SIGLAS

ANA	- Agência Nacional de Águas
ASCII	- American Standard Code for Information Interchange
AWT	- Abstract Windowing Toolkit
CAD	- Computer Aided Design
CASE	- Computer-Aided Software Engineering
DDL	- Data Description Language
DML	- Data Manipulation Language
DXF	- Drawing Exchange Format
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IDE	- Integrated Development Environment
JDBC	- Java Data Base Connectivity
JSE	- Java Standard Edition
MDT	- Modelo Digital de Terreno
OMG	- Object Management Group
PNRH	- Plano Nacional de Recursos Hídricos
REM	- Retângulo Envolvente Mínimo
SGBD	- Sistema Gerenciador de Banco de Dados
SIG	- Sistema de Informação Geográfica
SINGREH	- Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SQL	- Structured Query Language
TIN	- Triangulated Irregular Network
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
UML	- Unified Modeling Language

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 JUSTIFICATIVA.....	14
1.2 OBJETIVO GERAL.....	16
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.4 PREMISSAS E RESTRIÇÕES.....	17
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 FENÔMENOS TERRESTRES E SUAS PROPRIEDADES.....	19
2.2 ORGANIZAÇÃO E REPRESENTAÇÃO DE DADOS ESPACIAIS.....	25
2.2.1 Conceituação de grafo	25
2.2.2 Grafos e suas propriedades	26
2.2.3 Topologia	27
2.2.4 Representação da estrutura topológica.....	28
2.2.5 Polilinhas.....	29
2.2.6 Polilinhas e interseção de retângulos.....	31
2.2.7 Interseção de dois segmentos de reta	33
2.3 ORGANIZAÇÃO E REPRESENTAÇÃO DE DADOS TEMPORAIS.....	34
2.3.1 Estrutura temporal.....	35
2.3.2 Modelo de “retratos sequenciais” ou <i>snapshots</i>	36
2.4 O MODELO DE FENÔMENOS TERRESTRES.....	36
2.5 ELEMENTOS E CARACTERÍSTICAS DE REDES DE DRENAGEM.....	40
2.5.1 Elementos de redes de drenagem	41
2.5.2 Características físicas de redes de drenagem	42
2.5.3 Hierarquização da rede de drenagem e métodos de ordenamento	47
2.5.4 Extração de redes de drenagem	49
2.5.5 Aplicações que empregam redes de drenagem.....	49
2.6 CARACTERÍSTICAS DA MODELAGEM ORIENTADA A OBJETOS.....	51
2.6.1 Modelos de dados	52
2.6.2 Orientação a objetos	53
2.6.3 A linguagem de modelagem unificada (UML)	54
2.6.4 Diagramas da UML	55
2.6.5 Vantagens no emprego da UML para a construção de modelos	56
2.6.6 Diagramas de casos de uso	57
2.6.7 Diagramas de classes	58
2.6.8 Diagramas de atividades.....	61
2.6.9 Modelo de classes do domínio	63
2.6.10 Visibilidade e acessibilidade.....	64
2.6.11 Relacionamentos, navegabilidade e multiplicidade.....	64
2.6.12 Associação, agregação e composição	65
2.6.13 Heranças, subclasses e superclasse	66
2.7 CARACTERÍSTICAS DA LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO JAVA.....	67
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	71
3.1 MATERIAL UTILIZADO.....	71
3.1.1 Arquivos de dados.....	72
3.1.2 Redes de drenagem.....	74

3.1.3	Ambientes de software.....	76
3.2	METODOLOGIA	77
3.2.1	Adaptação da terminologia.....	77
3.2.2	Fluxo geral do trabalho.....	78
3.2.3	Determinação do escopo do modelo.....	79
3.2.4	Estudo e preparação dos dados	80
3.2.5	Construção do modelo de classes de objetos.....	82
3.2.6	Desenvolvimento do protótipo de software	85
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	89
4.1	DIAGRAMA DE CLASSES DE OBJETOS DE REDE DE DRENAGEM	89
4.2	O PROTÓTIPO DE SOFTWARE DESENVOLVIDO.....	96
4.3	EXPERIMENTOS E RESULTADOS.....	103
4.4	DISCUSSÃO DO MODELO PROPOSTO.....	123
5	CONCLUSÕES.....	124
	REFERÊNCIAS.....	128
	APÊNDICES	134

1 INTRODUÇÃO

Keates (1973, p. 20) divide o conjunto total de fenômenos visíveis possíveis de representação na cartografia topográfica em dois grandes grupos: meio físico e meio humano. Segundo o autor, o meio físico é “composto dos elementos naturais ou dependentes destes, mesmo quando modificados ou influenciados pelo homem”; meio humano é “composto de todas as feições construídas pelo homem”.

Fenômenos identificáveis da superfície terrestre, contendo uma posição específica sobre esta superfície, podem ser agrupados quanto à natureza, quanto à forma de ocorrência, distribuição ou comportamento e quanto à estrutura de atributos que capturam características associadas com cada semântica, estabelecendo-se classes de fenômenos terrestres. Entre os diversos fenômenos do meio físico, encontram-se os corpos hídricos. Exemplos destes corpos são oceanos, lagos e rios. Segundo Pinto *et al.* (1976, p. 36), estes corpos são formados pelo escoamento superficial das águas que têm origem fundamentalmente nas precipitações. Este escoamento de águas é visto como o segmento do ciclo hidrológico que estuda o deslocamento das águas na superfície da Terra. À medida que as águas vão atingindo os pontos mais baixos do terreno, passam a escoar em canalículos que formam a microrrede de drenagem. A dimensão destes pequenos canais vai aumentando com a ação da erosão e o escoamento se processa, cada vez mais, por caminhos preferenciais. “Chama-se rede de drenagem ao conjunto dos cursos de água desde os pequenos córregos formadores até o rio principal” (PINTO *et al.*, 1976, p. 37). A figura 1 ilustra uma típica rede de drenagem.

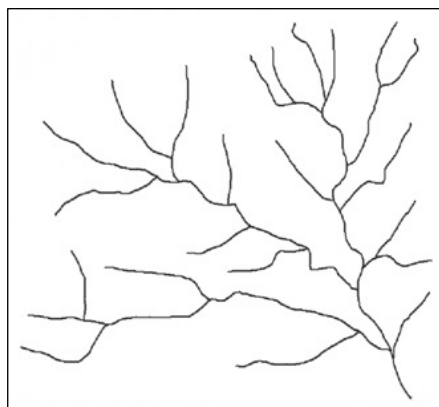


FIGURA 1 - EXEMPLO DE REDE DE DRENAGEM
FONTE: O autor (2008)

Segundo Ichoku *et al.* (1996, p. 4), redes de drenagem são basicamente fenômenos associados a morfologia terrestre e têm sido indispensáveis em ciências cartográficas, geológicas, entre outras. Elas normalmente formam a base na qual a morfologia e as paisagens são caracterizadas e muitas conclusões geológicas são fundamentadas em inferências derivadas delas, segundo os autores. Quase todos os mapas representam-nas como um fenômeno terrestre de referência.

Se em épocas distintas, dois ou mais levantamentos topográficos apresentarem um recobrimento para uma determinada região, é possível se obter “versões temporais” da rede de drenagem. Como estes levantamentos sobre uma região acontecem normalmente em tempos distintos e em intervalos de tempos variáveis, toda a geometria da rede fica indexada àquela base de tempo do levantamento, caracterizando-se como uma série temporal discreta e não-uniforme.

A representação espaço-temporal de redes de drenagem num modelo formal pode ter especial utilidade em certas aplicações de SIG que necessitem associar e extrair informações de cada trecho de canal. Esta representação pode ter utilidade em diversas atividades, tais como: estudo de relevo, determinação de áreas com risco de erosão do solo, transporte de poluentes, delimitação de áreas inundadas e estudo de bacias hidrográficas (ROSIM; PELLEGRINO, 1999, p. 1), gestão de recursos hídricos (TEIXEIRA *et al.*, 2007), em outorgas de bacias hidrográficas (ZEILHOFER *et al.*, 2007) e em estudos da determinação e distribuição espacial de doenças (ROCHA *et al.*, 2007). Aplicações destas naturezas podem ser beneficiadas se um modelo de dados puder ser utilizado para expressar computacionalmente estes fenômenos.

O poder e a capacidade dos sistemas de informação dependem largamente de cuidadoso projeto de seu modelo de dados, esse visto como núcleo conceitual do sistema (YUAN *et al.*, 2004). Um modelo de classes de objetos procura estender este modelo de dados, aumentando o poder de abstração e conferindo maior aproximação semântica com o fenômeno investigado, pois além de capturar atributos do fenômeno, possibilita definir operadores que modelam comportamento. O modelo de classes de objetos também pode ser estendido para expressar novos fenômenos especializados ou advindos de uma combinação entre eles.

Vieira (2004) define as bases de um arcabouço de classes gerais de objetos para modelar fenômenos terrestres. Esta estrutura de classes foi modelada com o

auxílio da UML (Unified Modeling Language) e aponta algumas perspectivas para se realizar extensões futuras ao seu modelo. Entre as principais classes, o autor define as classes *AreaLevantamento*, *Recobrimento* e *FenomenoTerrestre* e classes especializadas desta última, como por exemplo, *CorpoHidrico*, *AfloramentoRochoso*, *CoberturaVegetal*, entre outras, recomendando novos estudos para estas especializações.

A falta de um modelo próprio de classes de objetos que definisse conceitualmente no espaço e no tempo redes de drenagem motivou a realização deste trabalho. Partindo-se de algumas premissas e restrições adiante enumeradas, este trabalho procura estender por meio da UML aquele modelo a partir das classes citadas, para definir um modelo de classes de objetos para redes de drenagem. Para o escopo desta pesquisa, o estudo se concentrou nos requisitos espaciais (geométricos e topológicos) e temporais de redes de drenagem encontradas naturalmente sobre a superfície terrestre.

1.1 JUSTIFICATIVA

A Lei Federal Nº 9.433/07 instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), além de tratar de outras regulamentações (BRASIL, 2007). Entre os objetivos deste sistema está a formação de um banco de dados geoespacial nacional de redes hidrográficas. Este evento certamente trouxe desafios adicionais para instituições como a ANA - Agência Nacional de Águas e pesquisadores, como na formulação da estratégia de desenvolvimento do SINGREH (fig. 2) e na formação do mencionado banco, especificamente no trabalho referente à modelagem e ao tratamento dos dados geoespaciais da hidrografia. Neste sentido, Holtz (2005) enfatiza a necessidade de planejamento integrado de recursos hídricos, capacitado com “instrumentos adequados, inclusive modelagem sofisticada e que permita interação entre os vários atores das bacias hidrográficas”.

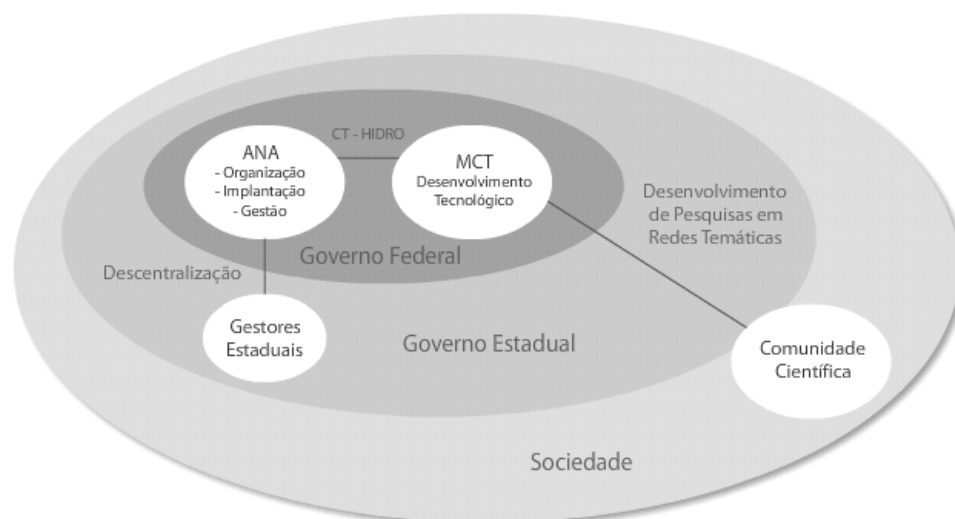


FIGURA 2 - VISÃO GERAL SOBRE ESTRATÉGIA DE DESENVOLVIMENTO DO SNIRH
 FONTE: AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2007)

Esta pesquisa procura atender parcialmente esta demanda, trazendo os seguintes benefícios:

- a) definição do processo de composição da geometria da rede de drenagem a partir de elementos geométricos como pontos e linhas;
- b) definição do modelo de classes de objetos de redes de drenagem associando estas classes com os seus elementos;
- c) definição dos principais atributos e operadores das classes de objetos sob o ponto de vista geométrico e temporal;
- d) desenvolvimento de software, na forma de um protótipo, que utilize este modelo de classes de objetos, a partir da leitura de um arquivo de dados de redes de drenagem.

Como principais beneficiários deste trabalho, pode-se elencar:

- a) usuários de SIG;
- b) usuários e gestores de recursos hídricos;
- c) desenvolvedores de software e de extensões para ambientes de SIG;
- d) pesquisadores, professores e estudantes.

1.2 OBJETIVO GERAL

Definir um modelo espaço-temporal para representar redes de drenagem sob o ponto de vista geométrico e topológico, tendo por base o modelo *FenomenoTerrestre* proposto por Vieira (2004). Para esta definição, necessita-se entender o conceito de rede de drenagem e como expressá-la por meio de classes de objetos modeladas em UML.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral proposto, os seguintes objetivos específicos foram arrolados:

- a) pesquisar informações essenciais inerentes à estrutura de redes de drenagem como: nomenclatura, termos, expressões, padrões de distribuição espacial, principais características físicas, ordenamento de elementos, entre outras informações. Este objetivo possibilitará ganhar conhecimento do fenômeno investigado;
- b) analisar o modelo de fenômenos terrestres existente e a possibilidade de integrar o modelo proposto com o modelo de fenômenos terrestres. Este objetivo deverá indicar em quais aspectos e em que grau os modelos se integrarão;
- c) estudar os dados inerentes às redes de drenagem. Este objetivo permitirá descobrir como os dados se relacionam aos elementos de redes de drenagem;
- d) desenvolver um protótipo de software utilizando uma linguagem orientada a objetos no qual será implementado o modelo espaço-temporal de redes de drenagem. Este objetivo permitirá aplicar o modelo de redes de drenagem numa aplicação de software, possibilitando visualização gráfica da rede e produção de resultados;
- e) verificar se o modelo proposto permite representar, espacialmente e temporalmente, redes de drenagem e seus elementos. Este objetivo permitirá concluir se o modelo é capaz de responder satisfatoriamente

questões sobre métricas e de topologia de redes de drenagem, ao longo de séries históricas.

1.4 PREMISSAS E RESTRIÇÕES

Para viabilizar esta pesquisa no tempo determinado, e melhor definir o escopo dos trabalhos, as seguintes premissas e restrições foram definidas:

- a) a ênfase do modelo de rede de drenagem está em aspectos geométricos e topológicos, não se considerando a influência do ciclo hidrológico e fatores como cobertura vegetal, entre outros. A geometria considerada emprega pontos e retas. Trechos da rede de drenagem são considerados unicamente ao longo da superfície terrestre sem considerar o desaparecimento e ressurgências deles;
- b) os dados serão homogêneos em termos de escala e em relação a origem deles. Isto significa que os dados de uma série histórica, para uma mesma rede de drenagem, serão considerados sem variação de escala ou de sistema referencial de coordenadas;
- c) a ordem dos dados espaciais de redes de drenagem produzidos pelos processos de aquisição segue o sentido de montante a jusante da rede. Isto permite que arquivos de dados de redes de drenagem possam ser utilizados, mesmo que os dados de altitude dos pontos não existam ou estejam incompletos;
- d) a temporalidade é discreta, não uniforme, associada à rede de drenagem completa e indexada por diferentes levantamentos;
- e) as razões das variações espaciais dos elementos de uma dada rede de drenagem, ao longo da série temporal, são irrelevantes neste trabalho.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 2 apresenta uma revisão de literatura e está organizado em seis partes: (i) propriedades de fenômenos terrestres; (ii) organização e representação de dados espaciais; (iii) organização e representação de dados temporais; (iv) o modelo de fenômenos terrestres; (v) elementos e principais características de redes de drenagem; (vi) características da modelagem orientada a objetos.

O capítulo 3 descreve os recursos e arquivos de dados utilizados. Apresenta a metodologia empregada, explicando os passos realizados para a construção do modelo de rede de drenagem. Descreve também algumas particularidades do protótipo de software.

O capítulo 4 apresenta os resultados alcançados e discussões, explicando em detalhes o diagrama de classes de objetos de redes de drenagem. Na sequência são apresentados os resultados da execução do protótipo desenvolvido, para alguns exemplos de redes de drenagem.

O capítulo 5 relata as conclusões obtidas e sugere uma lista de recomendações e melhoramentos que podem ser estendidos ao modelo de classes de objetos proposto e ao protótipo desenvolvido.

Os apêndices apresentam alguns trechos de programação desenvolvidos para o protótipo, uma revisão do processo de extração de rede de drenagem, a partir de um conjunto de pontos topográficos, e um resumo de utilização de um conversor bidirecional entre arquivos *shapefiles* e arquivos em formato de textos (ASCII).

2 REVISÃO DE LITERATURA

Para auxiliar na busca pelo cumprimento dos objetivos propostos, o estudo de revisão foi organizado nos seguintes tópicos: fenômenos terrestres e suas propriedades, organização e representação de dados espaciais, organização e representação de dados temporais, o modelo de fenômenos terrestres, elementos e características de redes de drenagem, características da modelagem orientada a objetos e características da linguagem de programação Java.

2.1 FENÔMENOS TERRESTRES E SUAS PROPRIEDADES

O entendimento que um observador tem sobre um fato pode ser capturado num modelo semântico que simplifica e sistematiza o fato idealizando-o num ato de abstração da realidade. Esta abstração, realizada por meio da seleção de alguns aspectos do fenômeno e de interesse do observador, pode ser representada para estudos e resolução de problemas associados ao fato. Corretamente construído, o observador pode realizar análises que conduzirão a resultados. A interpretação destes resultados, quando o modelo e o fenômeno forem apropriados possibilitarão fazer inferência sobre o fato (VIEIRA, CARVALHO e SLUTER, 2002). Este processo de estudo de um fato é ilustrado pela figura 3.

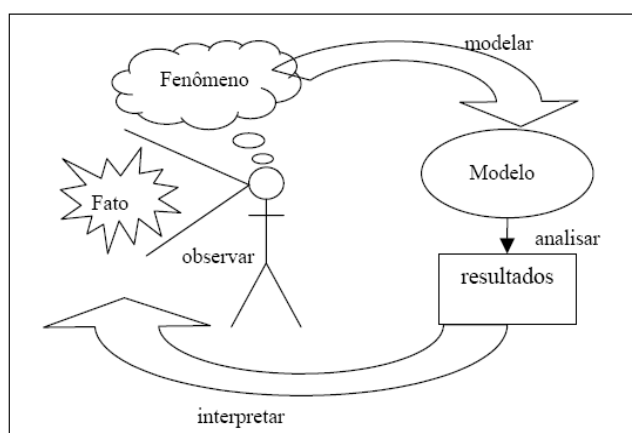


FIGURA 3 - DIAGRAMA DE ETAPAS DO PROCESSO DE ESTUDO DE UM FATO
FONTE: VIEIRA (2004)

Fenômeno terrestre pode ser definido como sendo um fato observado sobre uma superfície terrestre. Citam-se como exemplos: vegetação, afloramento rochoso, edificação, estrada, rio, lago, entre outros. Define-se feição como o fenômeno terrestre representado em mapas ou como sendo o elemento de um conjunto de fenômenos com atributos comuns de função e de posição (ROBINSON *et al.*, 1995, p. 178). “Feições são a soma de nossas interpretações de fenômenos geográficos” (ROBINSON *et al.*, 1995, p. 169).

Dados de fenômenos terrestres em aplicações espaço-temporais de SIG podem ser classificados em cinco tipos diferentes, segundo Price *et al.*¹ (1999, apud Souza, 2004):

- dados espaciais: são dados que possuem somente um domínio espacial, por exemplo, limites de uma propriedade;
- dados temporais: são dados que possuem somente um domínio temporal, por exemplo, hora do vôo;
- dados espaço-temporais: são dados espaciais cuja geometria se altera com o tempo (forma, tamanho, posição ou orientação);
- variação espacial, temporal ou espaço-temporal dos dados alfanuméricos: são dados que têm somente um domínio semântico, ou seja, não são nem espaciais e nem temporais (acidez do solo, por exemplo), e cujos valores se alteram com o tempo e/ou no espaço;
- dados compostos espaciais, temporais ou espaço-temporais: são dados cujos componentes que os formam mudam temporal ou espacialmente.

Nos três últimos casos, os atributos se alteram com o passar do tempo e/ou espacialmente, e portanto é necessário armazenar tanto o valor inicial quanto as variações que ocorrem.

No estudo de fenômenos terrestres, algumas características devem ser investigadas, tendo em vista a necessidade de se definir um modelo destes fenômenos que formalize a dimensionalidade espacial e a dimensionalidade

¹ PRICE, R.; SRINIVASAN, B.; RAMAMOHANARAO, K. Extending the Unified Modeling Language to Support Spatiotemporal Applications. **Asia Technology of object Oriented Languages and Systems**. 1999. p. 163-174.

temporal. Laurini e Thompson (1998, p. 38-49) exemplificam algumas propriedades espaciais em função do fenômeno, de forma individual ou coletiva. De forma individual, pode-se citar:

- a) comprimento, como por exemplo, de um canal de drenagem ou o comprimento do trecho ou parte de um canal;
- b) área da superfície, como de um lago, de uma ilha ou de um lote;
- c) volume, como em cortes e aterros;
- d) forma, regular ou não, como por exemplo, um polígono definindo um município;
- e) orientação;
- f) linha central imaginária ou de possível simetria de um polígono;
- g) declividade, como no caso de uma encosta ou de um canal.

Quando os fenômenos são agrupados entre si, outras propriedades espaciais podem ser evidenciadas. São exemplos:

- a) padrão de distribuição (concentrado ou disperso);
- b) disposição (*layout*) de regiões (compacta ou fragmentada);
- c) distanciamento relativo (de um ponto para outro) ou acumulado;
- d) número de países vizinhos de um país;
- e) densidade de drenagem numa bacia hidrográfica;
- f) fluxo predominante de emigrantes num continente;
- g) sequenciamento de fenômenos.

É importante diferenciar entre as propriedades que requerem medidas por meio da utilização de coordenadas, ou seja, com informação métrica, das propriedades fundamentadas na informação não-métrica, que definem qualidade do espaço ou do relacionamento espacial, como conexões entre locais. Estas propriedades, ditas topológicas, são:

- a) conectividade;
- b) orientação (de, para);

- c) adjacência ou vizinhança;
- d) continência².

Observa-se que alguns conceitos espaciais podem ser medidos tanto no domínio geométrico como no topológico. Por exemplo, a distância entre o início e término de uma cadeia de segmentos de retas interconectados pode ser medida pela soma das distâncias de cada segmento consecutivo, ou simplesmente pelo número de segmentos da cadeia total. Além disso, a identificação ou medida das propriedades dos relacionamentos espaciais, como distância ou conectividade, requer o uso de uma classe de entidade especial formada por um par de objetos ou díade. Por exemplo, um trecho de canal de drenagem referido como um arco, requer um nó inicial e um nó final. Propriedades espaciais adicionais também podem ser encontradas quando diferentes fenômenos são estendidos, tendo ocorrências espaciais similares, favorecendo comparações entre distribuições e dando surgimento a conceitos como sobreposição e interseção.

É possível afirmar que o fenômeno terrestre é percebido pelo observador por meio de uma “superfície”. No contexto de uma aplicação, a dimensionalidade está associada à idealização desta “superfície” do fenômeno. Assim, é possível que fenômenos possam ser representados numa dimensionalidade menor: 2D (superfície como uma poligonal plana), 1D (superfície degenerada como uma sequência de pontos) ou 0D (reduzida a um único ponto). Tomando-se como exemplo uma rede de drenagem, para uma aplicação específica, a dimensionalidade 1D poderia ser adequada, representando-se as conexões e caminhos pela rede. Já em outra aplicação, além das conexões e caminhos, as margens da rede e suas declividades poderiam ser necessárias elevando-se a dimensionalidade para 3D (VIEIRA, 2004, p. 44-45).

Fenômenos terrestres podem ser percebidos como mutáveis ao longo de um determinado período de tempo. Embora desconsiderada em muitos estudos de

² Esta propriedade também pode ser encontrada na literatura com as denominações: *pertinência*, *circunscritividade* ou *contenção*.

SIG, Hadzilacos e Tryfona³ (1996, *apud* Lisboa Filho e Iochpe, 1999) consideram que a temporalidade no estudo de fenômenos terrestres é necessária no sentido que o tempo torna-se uma propriedade obrigatória para se armazenar séries históricas de dados para efeitos de estudos de evolução dos fenômenos, e não tanto pela frequência de atualização dos dados. Yuan (1996, p. 7) reconhece que o acompanhamento das identidades dos fenômenos terrestres, propriedades geométricas e seus relacionamentos topológicos ao longo do tempo, é de alta complexidade, fato este que vem merecendo a atenção de diversos pesquisadores. Souza (2004, p. 31-32) apresenta um resumo (tab. 1) comparando as características dos diversos métodos temporais estudados ao longo das últimas décadas.

TABELA 1 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS ESPAÇO-TEMPORAIS PARA SIG

MODELO	REPRESENTAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL POR:	MODELO DE DADOS	COMO REGISTRA AS MUDANÇAS	BASEADO	VANTAGEM	DESvantAGEM
Retratos Sequenciais ARMSTRONG (1988)	Matriz de um domínio de um tema (cenários)	Campo ou objeto	Gera um novo cenário com todas as feições independentemente do que foi alterado	Localização e tempo	Consulta sobre qualquer local ou entidade em dado momento	Volume e redundância dos dados
Composição Espaço-temporal LANGRAN e CRHISMAN (1988)	Unidades de atributo único, espacialmente homogêneas e temporalmente uniformes	Objeto	Novos nós e conexões formam novos polígonos com histórico individual	Entidade geográfica	consulta sobre mudanças em determinado local	Volume de dados e Complexidade das operações
Vetor Emenda LANGRAN (1989)	Coordenadas tri-dimensional (2 dimensões espaciais e uma dimensão temporal)	Objeto	Na geometria das entidades geográficas, através de um vetor emenda e a criação de um novo objeto	Entidade geográfica	Reproduz mudanças assíncronas e, consulta sobre mudanças em determinado local	Topologia espaço- temporal complexa
Composição Espaço-temporal LANGRAN (1992)	Matriz associada a uma lista de atributos	Campo	Novo registro na lista de atributos com novo valor e data	Localização	Elimina a redundância de dados	
Objeto espaço-temporal WORBOYS (1992)	Objetos espaço-temporais 3D discretos (1D tempo e 2D espaço) Orientado a objeto	Objeto	Através de átomos espaciais temporal e espacialmente uniformes	Objetos espaço- temporais	Evolução na forma, propriedades e localização de objetos	Não representa fenômenos dinâmicos
SAIF KUCERA e SONDHEIM (1992)	Objetos espaço-temporais 3D discretos (1D tempo e 2D espaço) Orientado a objeto	Campo e objeto	Através do atributo de tempo de uma classe ou objeto	Objetos espaço- temporais	Facilidade de uso Implementado e reconhecido como padrão	Nem todos os programas SIG comerciais implementam a orientação a objeto
TRIAD PEUQUET (1994)	3 modelos de representação: - localização - objeto - tempo	2 campos 1 objeto	Armazena as alterações nos modelos de localização e objeto e referencia no modelo tempo	Estrutura híbrida	Consulta sobre objeto, localização e tempo	Não representa fenômenos dinâmicos
ESTDM PEUQUET e DUAN (1995)	Matriz associada a uma lista de eventos	Campo	Lista de eventos	Eventos (tempo) e processos	Consultas sobre tempo Mostra transição e Alteração na propriedade e localização de um objeto	Não representa mutação e movimento de um objeto dinâmico
Oogeomorph RAPER e LIVINGSTONE (1995)	Quadri-dimensional Objetos de dados pontuais agregados a uma extensão espacial e temporal	Objeto	1 novo registro para cada observação, com localização (X,Y,Z) e tempo (ano/mês/dia/hora)	Processos	Mostra transição e Alteração na propriedade e localização de um objeto	Não representa mutação e movimento de um objeto dinâmico
Hierárquico com 3 modelos YUAN (1999)	3 modelos de representação: - evento - processo - estado	Campo e objeto	Eventos associados a um conjunto de processos, associados a um conjunto de estados	Processos	Representa transição, mutação e movimento de Fenômenos dinâmicos	

FONTE: SOUZA (2004)

³ HADZILACOS, T.; TRYFONA, N. Logical data modelling for geographical applications. International Journal of Geographical Information Sciences, 10(2): 179-203, 1996.

De acordo com Yuan (1996, p. 8), as mudanças podem ocorrer nos atributos do fenômeno terrestre, nas características do ambiente, nos comportamentos de um evento ou nos mecanismos dos processos. Segundo o autor, existem seis tipos principais de mudanças na informação geográfica:

- I. para um dado local geográfico onde ocorrências e a duração de eventos ou atributos podem variar de tempos em tempos, a análise é feita fixando o local, controlando o atributo e medindo o tempo;
- II. para um dado ponto no tempo onde um certo fenômeno pode variar suas características de um local para outro, a análise é feita fixando-se o tempo, controlando o atributo e medindo o local;
- III. para um dado período de tempo onde os atributos podem variar de um local para outro através do tempo, a análise é feita fixando-se o tempo, controlando os locais e medindo-se os atributos;
- IV. para um dado evento onde suas características ou processos podem variar em locais através do tempo, a análise é feita fixando-se os atributos, controlando os locais e medindo-se o tempo;
- V. para uma dada área onde atributos podem variar de local para local, a análise é feita fixando-se o local, controlando o tempo e medindo-se os atributos;
- VI. para um dado evento onde seu local pode variar de tempos em tempos, a análise é feita fixando-se os atributos, controlando-se o tempo e medindo-se os locais.

Segundo Yuan (1995), mudanças do tipo I envolvem variações nos atributos ao longo do tempo e não há variação das propriedades espaciais e a modelagem e análise pode ser realizada totalmente no domínio semântico como transações históricas num sistema de gerenciamento de banco de dados. Mudanças do tipo II descrevem distribuições espaciais estáticas de um fenômeno, como por exemplo o relevo e técnicas de construção de curvas de nível ou de mapas coropléticos podem ser empregadas para apresentar tais informações. Mudanças do tipo III ao tipo VI alteram a geometria e a topologia de propriedades espaciais e temporais.

2.2 ORGANIZAÇÃO E REPRESENTAÇÃO DE DADOS ESPACIAIS

McAllister (1999, p.14-15) considera que grafos planares e orientados são representações convenientes para redes de drenagem e lembra que algumas análises tratam-nas como estruturas em “árvore”, com o ponto mais a jusante da rede sendo a sua “raiz”. Estas considerações trazem importante contribuição no modo de como representar e dar ordenamento aos elementos de redes de drenagem.

2.2.1 Conceituação de grafo

Grafo pode ser entendido como um conjunto de pontos e linhas, estas linhas unindo certos pares de pontos deste conjunto. McAllister (1999, p. 6) define informalmente grafo como sendo uma relação entre dois ou mais objetos ou conceitos. Os objetos são os vértices ou nós, e a presença de uma relação entre dois objetos aparece como uma aresta entre os dois vértices para os objetos. Grafos podem ser representados por meio de um diagrama, de forma que o interesse do observador possa estar em quais pontos estão conectados ou não. A forma na qual eles são conectados é irrelevante (BONDY; MURTY, 1982, p. 1). Um grafo G é uma tripla ordenada $(V(G), E(G), \psi_G)$, onde $V(G)$ é um conjunto não-vazio de vértices em G , $E(G)$ é um conjunto de arestas (*edges*) disjunto em $V(G)$ e ψ_G uma função incidência que associa cada aresta de G a um par não-ordenado de vértices (não necessariamente distintos) de G . Se e é uma aresta e u e v são vértices tais que $\psi_G(e) = uv$, então e é dito que conecta u e v ; os vértices u e v são extremos de e . Por meio de um exemplo (figura 4) pode-se expressar:

$$G = (V(G), E(G), \psi_G)$$

$$V(G) = \{ v_1, v_2, v_3, v_4, v_5 \}$$

$$E(G) = \{ e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_8 \}$$

e ψ_G definido por:

$$\psi_G(e_1) = v_1v_2, \psi_G(e_2) = v_2v_3, \psi_G(e_3) = v_3v_3, \psi_G(e_4) = v_3v_4,$$

$$\psi_G(e_5) = v_2v_4, \psi_G(e_6) = v_4v_5, \psi_G(e_7) = v_2v_5, \psi_G(e_8) = v_2v_5$$

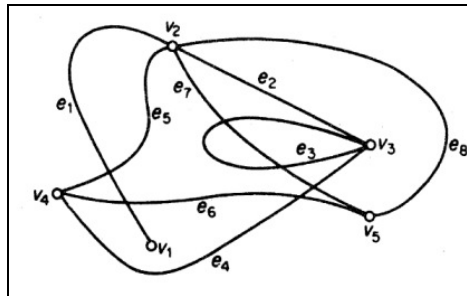


FIGURA 4 - EXEMPLO DE DIAGRAMA DE GRAFO
FONTE: BONDY e MURTY (1982)

2.2.2 Grafos e suas propriedades

Observa-se que não existe uma única maneira de se desenhar um grafo e a posição relativa dos pontos e linhas não tem significância. É possível que duas arestas se interceptem num ponto, como no exemplo da figura 3 (e_1 e e_6), mas este ponto não é necessariamente um vértice. Grafos são planares quando todas as arestas se interceptam somente em suas extremidades, caso contrário, quando se interceptam em pontos que não são vértices, os grafos são ditos não-planares. Se as arestas possuírem uma orientação (de-para) são ditos grafos orientados. Na figura 5, a ilustração (a) é um grafo planar, pois o arranjo dos vértices pode conduzir a não-interceptação das arestas e (b) é não-planar, pois não apresenta distribuição possível para as arestas se interceptarem somente nos vértices.

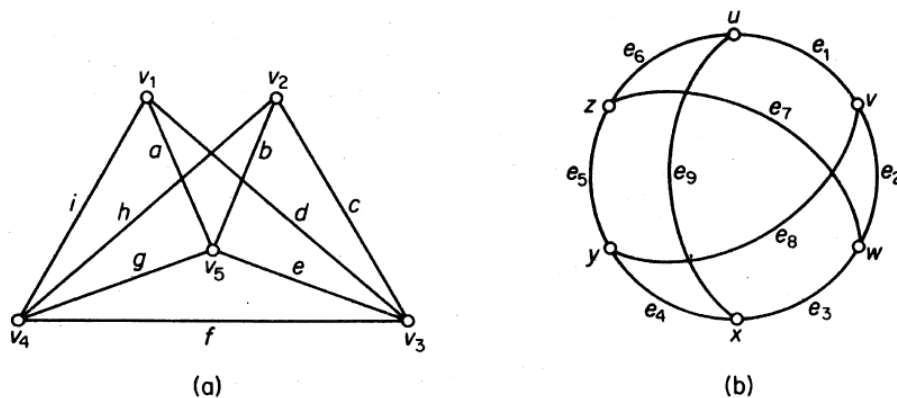


FIGURA 5 - GRAFO PLANAR E NÃO-PLANAR
FONTE: BONDY e MURTY (1982)

Dois grafos são ditos isomórficos se há uma correspondência um-para-um entre os vértices e suas arestas (DIESTEL, 2005, p. 3, 83). Em outras palavras, as condições de conectividade e adjacência correspondem mesmo que as formas entre eles variem. Grafos podem ser cíclicos se suas arestas ou parte delas formam um ciclo ou um laço e acíclicos quando não possuem ciclos, sendo neste último caso denominados grafos em árvores (DIESTEL, 2005, p. 13-14). Uma seleção de certas arestas contíguas num grafo produzem um caminho.

Considerando-se um diagrama de uma rede de transporte, por exemplo, é possível se desconsiderar informações como forma das linhas e comprimentos lineares, concentrando-se nos componentes estruturais, as junções e conexões. Os principais elementos passam a ser a conectividade e a orientação, este último termo significando o conhecimento das direções de início e fim de uma linha (LAURINI; THOMPSON, 1998, p. 176). Entretanto, para uma rede de drenagem, os vértices e arestas estão associados a elementos do mundo real e portanto, espacialmente determinados.

2.2.3 Topologia

Em bases de dados digitais, Laurini e Thompson (1998, p. 212-214) evidenciam a importância de reconhecer que algumas propriedades geométricas e topológicas podem não estar diretamente codificadas, tendo que ser derivadas de outros dados existentes. Assim, é importante identificar a topologia explícita, aquela que está registrada em tabelas de números. Algumas formas de organização de dados espaciais não codificam nenhuma propriedade topológica. No modelo geométrico, entidades podem ser manipuladas completamente isoladas, não sendo derivadas de outras entidades desconectadas. Este modelo codifica uma correspondência um-para-um entre uma entidade e um ponto, linha ou região e um registro na tabela. Somente a informação posicional é registrada. Assim, entidades são geometricamente definidas, mas nenhuma relação espacial é gravada. Por outro lado, no modelo topológico, dados estruturados podem ser manipulados algebricamente e aritmeticamente para produzir estatísticas, para revelar propriedades de grafos e de superfície ou para facilitar detecção de erros.

Propriedades topológicas são custosas de serem produzidas a partir de geometria, mas podem ser vantajosas na obtenção de alguns relacionamentos espaciais.

2.2.4 Representação da estrutura topológica

Para cada grafo G existe uma matriz $n \times e$ e chamada matriz de incidência de G ou $M(G) = [m_{ij}]$, onde m_{ij} é o número de vezes (0, 1 ou 2) que n_i e e_j são incidentes, sendo a matriz uma forma diferente de representar o diagrama do grafo. Uma outra matriz associada a G é a matriz de adjacência. Esta é uma matriz $A(G) = [a_{ij}]$ de ordem $n \times n$, na qual a_{ij} é o número de arestas unindo n_i a n_j (fig. 6).

A forma de representação de uma estrutura topológica pode variar convenientemente em função do tipo de densidade verificado pelas conexões entre seus nós. Se grafos apresentam uma densidade de conexões muito alta, a matriz de adjacência pode ser empregada. Essa matriz armazena as ligações existentes entre os nós de um grafo. Se o grafo for orientado, onde o sentido da ligação entre os pares de nós é relevante, a matriz poderá ser assimétrica.

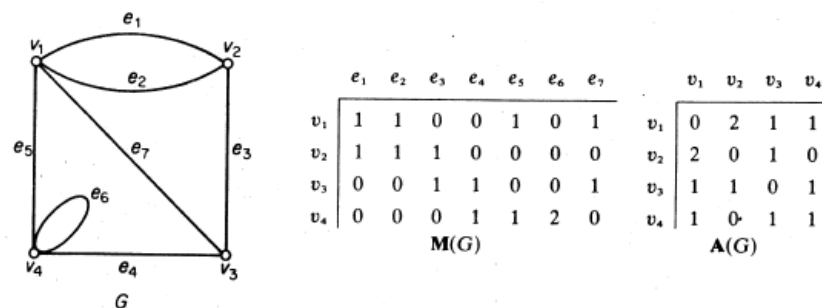


FIGURA 6 - GRAFO, MATRIZ DE INCIDÊNCIA E MATRIZ DE ADJACÊNCIA
FONTE: BONDY e MURTY (1982)

As arestas também podem receber um valor que represente o custo, tempo de percurso ou outro valor relacionado com o deslocamento de um nó para outro (WORBOYS, 1995, p. 232-233). Por outro lado, numa situação de grafos esparsos, onde poucas conexões acontecem entre os nós, uma lista de adjacência pode ser a mais indicada.

A utilização desta lista de adjacência é ilustrada na figura 7 para dois tipos de grafos: grafos orientados e não-orientados. Para cada um dos tipos de grafos, três listas são mantidas: a primeira informa qual a conectividade entre as arestas

(*links*), a segunda indica com qual nó uma dada aresta se conecta e a terceira registra quais arestas se conectam a um dado nó.

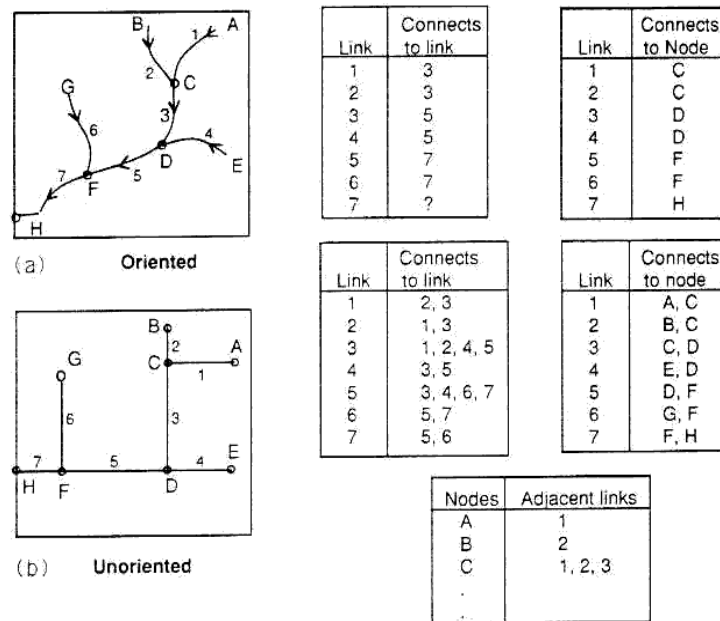


FIGURA 7 - LISTA DE ADJACÊNCIA PARA CADA NÓ (GRAFOS ESPARSOS):

(a) GRAFO ORIENTADO; (b) GRAFO NÃO-ORIENTADO

FONTE: LAURINI e THOMPSON (1998)

2.2.5 Polilinhas

Um grafo pode ser construído por meio de um conjunto de polilinhas. Worboys (1995, p. 100) define polilinha como sendo um conjunto finito de segmentos lineares, chamados arestas, tais que o ponto final de cada aresta é compartilhado exatamente por duas arestas, exceto possivelmente para dois pontos, chamados de extremos da polilinha. Pela própria definição, uma polilinha guarda uma relação ordenada de pontos, mas ela não indica necessariamente uma orientação. Ela pode representar um lugar ou coisa que tem comprimento mas não área, em qualquer escala. A figura 8 ilustra alguns exemplos de polilinhas.

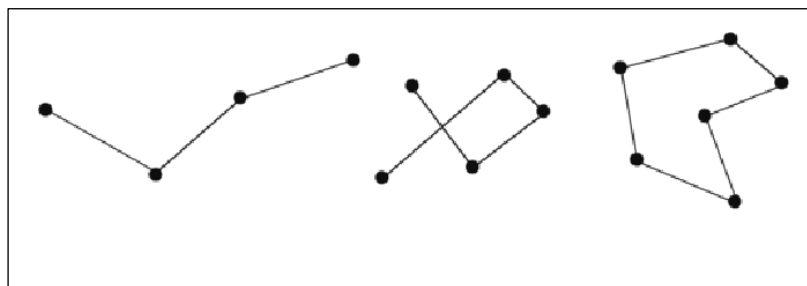


FIGURA 8 - EXEMPLO DE POLILINHAS
 FONTE: WORBOYS (1995)

Existem basicamente dois métodos de se codificar feições uni-dimensionais de mapas topográficos como uma cadeia de dados. A primeira consiste de se registrar segmentos lineares de comprimento e direções fixos. Exemplo deste método é a codificação encadeada (*chain encoding*). Neste processo, cada novo ponto final do segmento linear segue uma das oito direções possíveis em relação a seu ponto inicial, e uma melhor aproximação com o objeto cartográfico é obtida reduzindo-se o comprimento fixo unitário com consequente aumento do armazenamento de dados. Este método é mais apropriado para representação matricial de resolução fixa. O segundo método representa uma linha por uma cadeia de segmentos de linhas com direção e comprimentos variáveis. Cada ponto na cadeia é dado pelas coordenadas absolutas num sistema de coordenadas cartesiano. Este método é o usualmente utilizado na codificação de polilinhas (CROWLEY, 1992, p. 128-130).

Uma polilinha pode ter uma ou mais partes (ESRI, 1998). Por exemplo, um canal simples a céu aberto é tipicamente uma feição de polilinha com uma parte. Mas se o fluxo do canal prossegue de forma subterrânea e posteriormente ressurgue, ele pode ser representado como uma feição de polilinha multiparte com partes descontínuas. A figura 9 apresenta um exemplo de polilinha simples:

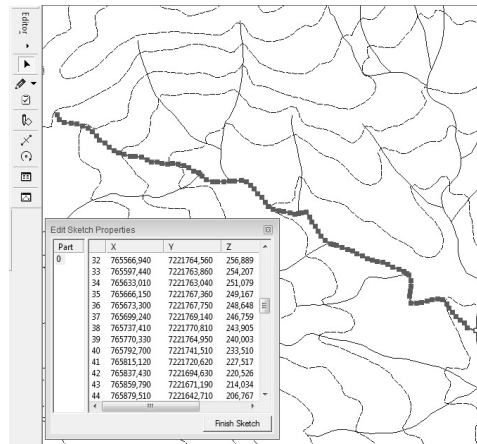


FIGURA 9 - VISUALIZAÇÃO DE UMA POLILINHA NO SOFTWARE ArcMap®
FONTE: O autor (2008)

Se o fluxo diverge ao redor de uma ilha e então reconverge, ele pode ser representado como uma feição polilinha multiparte com partes ramificadas. Uma feição polilinha multiparte está associada com um único registro numa tabela de atributos.

2.2.6 Polilinhas e interseção de retângulos

As polilinhas são elementos resultantes do processo de captura da rede de drenagem utilizado. Cada polilinha é representada por uma lista ordenada de pontos coordenados. Para uma mesma rede de drenagem, elas podem variar em quantidade e forma, conforme o processo manual de digitalização empregado ou do algoritmo utilizado no processo de extração e vetorização, não sendo necessariamente pré-definidas ou representando necessariamente um trecho de canal completo da rede de drenagem. Por esta razão, processos de simplificação que analisem e simplifiquem as relações entre elas, podem ser úteis antes da determinação das confluências.

Polilinhas entre si não guardam uma relação topológica explícita. Dadas duas polilinhas quaisquer, uma das seguintes relações pode ser observada: (a) conectividade, quando um dos pontos extremos de uma delas se conecta a um dos pontos extremos da outra; (b) interseção, quando um dos segmentos de uma delas se intercepta com um dos segmentos de outra, ou um dos extremos de uma “toca” um dos segmentos da outra; (c) disjuntas, quando nenhuma das relações anteriores

é verificada. Faz-se necessário determinar as relações entre elas para que a topologia na forma de arco-nó seja definida. As interseções entre duas ou mais polilinhas determinam as confluências de uma rede.

Dependendo do tamanho da rede, o custo computacional de determinações de interseções de polilinhas pode ser muito alto. De modo a diminuir este esforço, estratégias podem ser empregadas. Uma dessas estratégias é a utilização de retângulo envolvente mínimo ou REM (DAVIS JUNIOR; QUEIROZ, 2005, p. 49). O REM é o menor retângulo com lados paralelos aos eixos coordenados que contém a geometria da polilinha. Por comparação direta entre REMs de polilinhas, procura-se pelos REMs que se interceptam. A partir dessas interseções, é possível que as polilinhas possam se interceptar (fig. 10). Só então, nestas interseções de REMs, o algoritmo completo de determinação da possível interseção das polilinhas é executado.

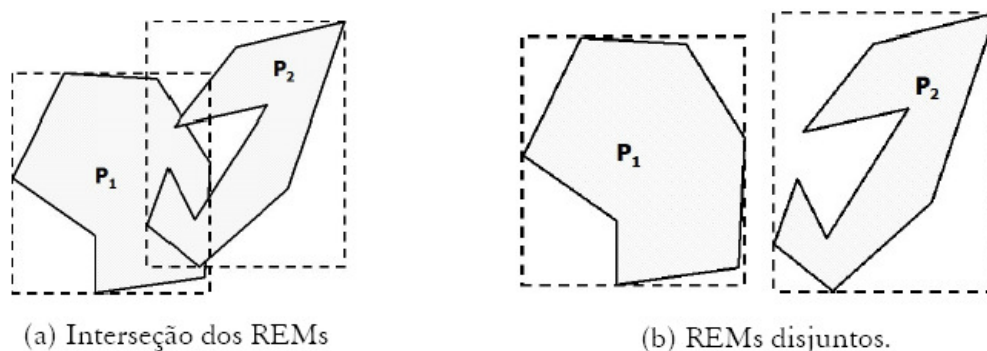


FIGURA 10 - INTERSEÇÃO DE REMs (a) REMs DISJUNTOS (b)
 FONTE: DAVIS JUNIOR e QUEIROZ (2005)

Um exemplo deste emprego pode ser visto na figura 11, obtida pela execução do protótipo deste trabalho. As linhas tracejadas mostram os REMs verificados para cada polilinha encontrada da rede de drenagem, cada qual com sua identificação numérica automaticamente atribuída pelo software e afixada próxima ao canto inferior esquerdo. Conforme comentado anteriormente, os processos de captura, extração, vetorização e simplificação utilizados podem conduzir a diferentes conjuntos de polilinhas para a mesma rede de drenagem, produzindo-se consequentemente diferentes REMs.

A utilização de REM para cada polilinha facilita o trabalho computacional, pois ao se fazer a determinação de interseções, os REM 2 e 6, por exemplo, não

precisarão do algoritmo completo de determinação, pois os mesmos não se interceptam. Por outro lado, tomando-se outros dois casos, os REMs 10 e 11, na parte inferior da figura 11, e os REM 16 e 17, ao centro da figura: no primeiro caso, os REMs se interceptam, então o algoritmo completo de determinação de intersecção é utilizado e é determinada a intersecção das respectivas polilinhas. Já no segundo caso, apesar dos REMs se interceptarem, o algoritmo também é utilizado, mas a intersecção das polilinhas respectivas não poderá ser obtida.

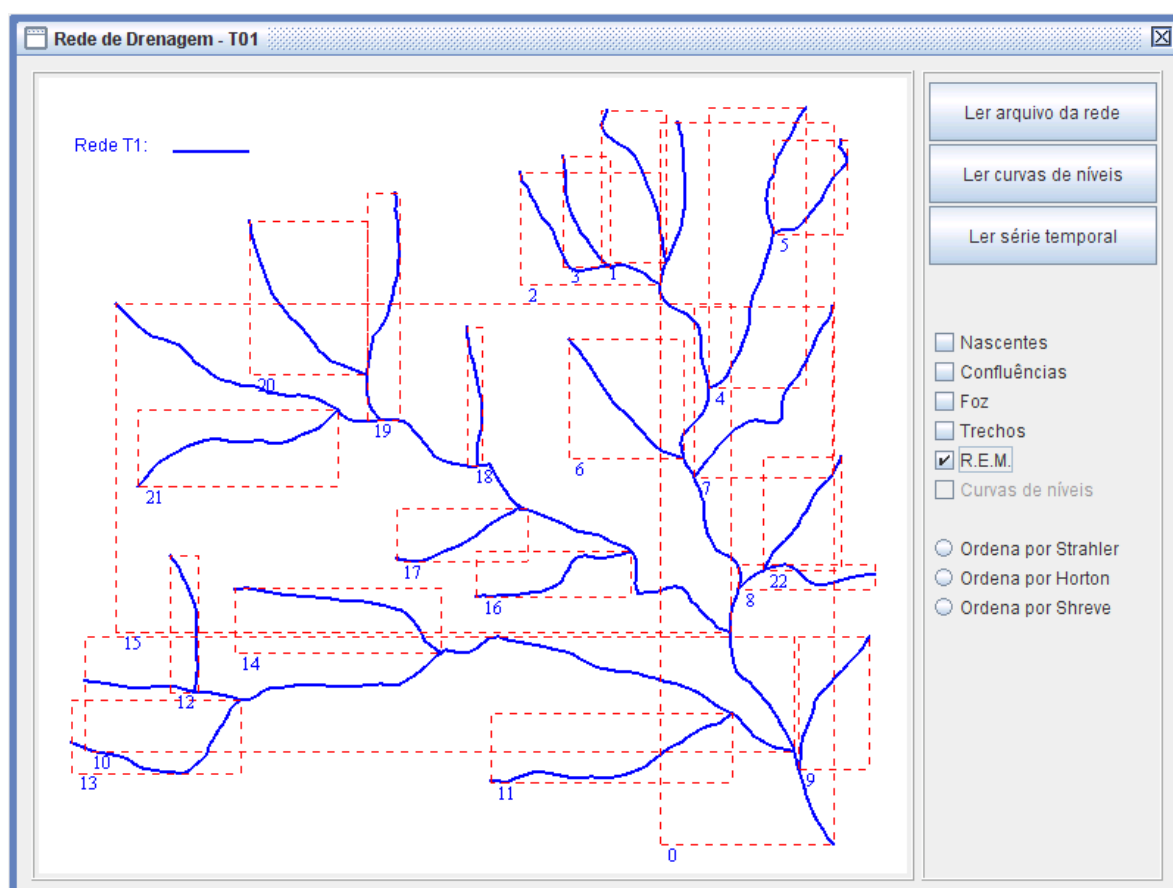


FIGURA 11 - USO DE REMS DE POLILINHAS PARA A DETERMINAÇÃO DE INTERSEÇÕES
FONTE: O AUTOR (2008)

2.2.7 Intersecção de dois segmentos de reta

Da geometria analítica sabe-se que uma forma de determinação do ponto de intersecção entre dois segmentos de reta pode ser pela solução de um sistema de duas equações de retas a duas incógnitas, provenientes da igualdade entre duas equações paramétricas dos segmentos. Seja um segmento formado pelos pontos

p_1p_2 e outro pelos pontos p_3p_4 , com $p_1=(x_1,y_1)$, $p_2=(x_2,y_2)$, $p_3=(x_3,y_3)$ e $p_4=(x_4,y_4)$, a interseção é dada por:

$$p_1 + u(p_2 - p_1) = p_3 + v(p_4 - p_3) \quad (1)$$

Dessa igualdade surge o sistema de equações:

$$\begin{cases} x_{intersec\ ao} = x_1 + u(x_2 - x_1) & \text{ou} & x_{intersec\ ao} = x_3 + v(x_4 - x_3) \\ y_{intersec\ ao} = y_1 + u(y_2 - y_1) & \text{ou} & y_{intersec\ ao} = y_3 + v(y_4 - y_3) \end{cases} \quad (2)$$

Desenvolvendo, chega-se a:

$$\begin{aligned} u &= \frac{(x_4 - x_3)(y_1 - y_3) - (y_4 - y_3)(x_1 - x_3)}{(y_4 - y_3)(x_2 - x_1) - (x_4 - x_3)(y_2 - y_1)} \\ v &= \frac{(x_2 - x_1)(y_1 - y_3) - (y_2 - y_1)(x_1 - x_3)}{(y_4 - y_3)(x_2 - x_1) - (x_4 - x_3)(y_2 - y_1)} \end{aligned} \quad (3)$$

que substituídos nas equações (2), resolvem a interseção. Nota-se que os denominadores das expressões u e v são os mesmos, portanto um só cálculo faz-se necessário numa implementação computacional. Se estes denominadores forem zero, os segmentos são paralelos. Se além dos denominadores, os numeradores em u e v forem zero, os dois segmentos são coincidentes.

2.3 ORGANIZAÇÃO E REPRESENTAÇÃO DE DADOS TEMPORAIS

O tempo em sistemas de informação pode ser medido em pelo menos duas dimensões distintas (WORBOYS, 1995, p. 309): dimensão do tempo de transação ("T-interval"), também chamado de tempo do banco de dados ou tempo do sistema e dimensão do tempo de validade ("V-interval"), também chamado de tempo do evento ou tempo do mundo real. A primeira registra o momento em que a informação referente ao fenômeno foi inserido na base de dados. A segunda indica o tempo durante o qual a informação registrada representa adequadamente a realidade modelada. Estas variáveis podem ser utilizadas isoladamente ou em conjunto em

sistemas de informação para acompanhar temporalmente um fenômeno, mediante o emprego de rótulos temporais ou *timestamps*.

2.3.1 Estrutura temporal

De uma forma geral, Worboys distingue diferentes tipos de estruturas temporais para cada dimensão temporal, ilustrando a classificação proposta segundo a figura 12:

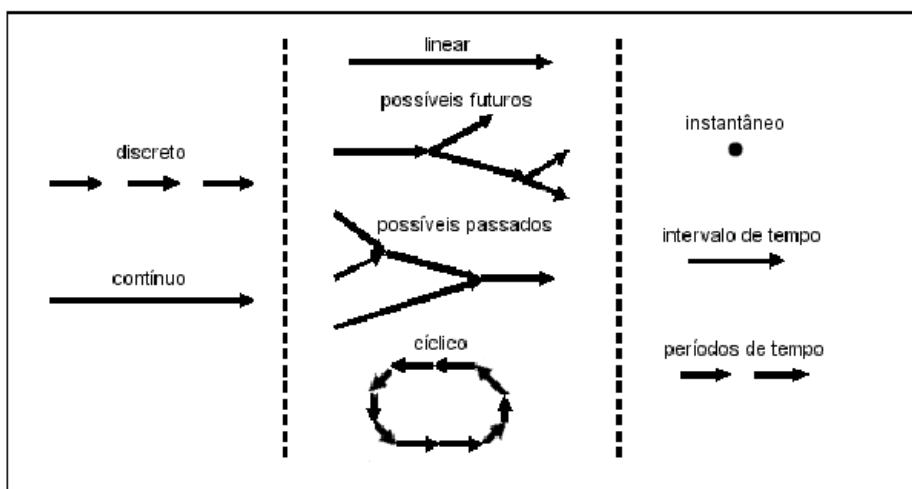


FIGURA 12 - ESTRUTURA TEMPORAL
FONTE: Worboys (1995, p. 309)

O tempo pode ser medido segundo uma variável discreta ou variável contínua. A variável discreta é utilizada onde a variação dos fenômenos é descontínua e ocorre na forma de “saltos” discretos. Para estes casos, o tempo pode ser medido em certos instantes temporais ou em intervalos de tempos, e a variação entre estes instantes ou intervalos é descontínua. Tomando-se a evolução dos limites de uma propriedade rural ao longo do tempo, por exemplo, é improvável que a demarcação da gleba de terras possa ocupar alguma posição intermediária ou que assuma uma interpolação entre os tempos t_1 e t_2 , mas que a evolução da demarcação ocorra em saltos discretos. A segunda variável, de forma contínua, é utilizada onde fenômenos podem estar associados a medidas de tempo, em diferentes níveis de precisão. Como exemplo, pode-se citar a precipitação de chuvas, onde as medidas de precipitação podem ser tomadas por um pluviômetro em instantes de tempo e por meio de alguma teoria de interpolação, obter os demais

valores. Na estrutura temporal da figura 12, o tempo também pode receber uma classificação de acordo com o ordenamento temporal, podendo ser do tipo linear, ramificado com possíveis futuros, ramificado com possíveis passados e cíclico, quando se modela eventos repetitivos. De forma geral, a linha de tempo pode ser vista como formada por um conjunto de intervalos de tempos discretos, indivisíveis, chamados de *chronons*. Num sistema de informação que envolva representação de dados temporal, é importante também estabelecer a duração deste *chronon*, denominada de granularidade, que deve ser adequadamente definida para registrar temporalmente o fenômeno, variável conforme a aplicação. Exemplos de granularidades podem ser: “dia, mês e ano”, podendo ser simbolizada pela notação “DD/MM/AAAA” e “dia, mês, ano, hora, minuto e segundo”, podendo ser simbolizada pelo valor “DD/MM/AAAA hh:mm:ss”.

2.3.2 Modelo de “retratos sequenciais” ou *snapshots*

Entre os modelos temporais citados por Souza (2004), o modelo de “retratos sequenciais” ou *snapshots* é o mais simples de se implementar apesar de sua ineficiência em termos de armazenamento, resultando em grande volume e redundância de dados (FREELAN, 2003, p. 15). Neste método, todos os fenômenos são registrados espacialmente em cada instante da série temporal discreta e não uniforme. Estes registros armazenam completamente todos os fenômenos, mesmo os fenômenos que não foram alterados entre um instante e o próximo. Este método possibilita a identificação e o estado de um fenômeno num determinado instante registrado, porém não é possível de se conhecer quando um determinado evento ocorreu, modificando espacialmente o fenômeno. O método de “retratos sequenciais” é o método adotado no modelo de fenômenos terrestres.

2.4 O MODELO DE FENÔMENOS TERRESTRES

Diversos trabalhos podem ser encontrados na literatura que modelam recursos hídricos (ZEILHOFER *et al.*, 2006), (TEIXEIRA *et al.*, 2007), (SOUZA, 2004) e (MAIDMENT, 2001). Estes modelos são apresentados, em geral, por meio de diagramas de entidade-relacionamento, por diagramas de classes de objetos,

lançando-se mão da UML, ou por meio de extensões gráficas destes diagramas tradicionais. A maioria dos modelos, no entanto, descrevem os elementos sendo representados espacial e temporalmente de forma simples e superficial, concentrando-se nos aspectos principais do trabalho. Outros modelos ignoram a temporalidade ou esta encontra-se presente somente na temática principal do estudo, tratando o fenômeno em si como imutável ao longo do tempo. Por outro lado, modelos mais sofisticados como o *ArcGIS Hydro Data Model*® (MAIDMENT, 2001), permitem descrever a hidrografia de águas superficiais de uma região, por meio de um conjunto complexo de dezenas de classes de objetos. Assim, este modelo incorpora outras questões além da definição espacial e temporal dos elementos constituintes do modelo, levando-se em conta aspectos relacionados com a aplicação, como ciclo hidrológico, aspectos operacionais, como conversão e transformação de dados, e aspectos de visualização como a representação em várias camadas (*layers*). Além disso, o modelo pode ser intrinsecamente dependente de um software de SIG ou de um arcabouço de classes específico, além de necessitar de treinamento especializado.

Por outro lado, o modelo de fenômenos terrestres proposto por Vieira (2006) representa fenômenos terrestres observados na cartografia topográfica e os contextualiza num arcabouço de não mais que três classes principais: *FenomenoTerrestre*, *AreaLevantamento* e *Recobrimento*. Este arcabouço formaliza os atributos espaciais, temporais e demais atributos desses fenômenos, por meio da notação universal da UML. A classe abstrata para fenômenos terrestres é especializada em subclasses para cada grupo de objetos semelhantes observados na superfície terrestre.

A figura 13 apresenta parte do diagrama de classes de objetos de fenômenos terrestres que define os objetos da classe *FenomenoTerrestre* no espaço, por meio da classe *Superficie*, e no tempo, por meio das classes *AreaLevantamento* e *Recobrimento*. Em função da dimensionalidade do fenômeno terrestre, a classe *Superficie* pode ser especializada. No exemplo da figura, para fenômenos que possuam uma só dimensão, a classe *Superficie1D* é utilizada, a qual por sua vez, define uma lista de pontos que compõem o fenômeno. Para outras dimensionalidades, outras classes são sugeridas.

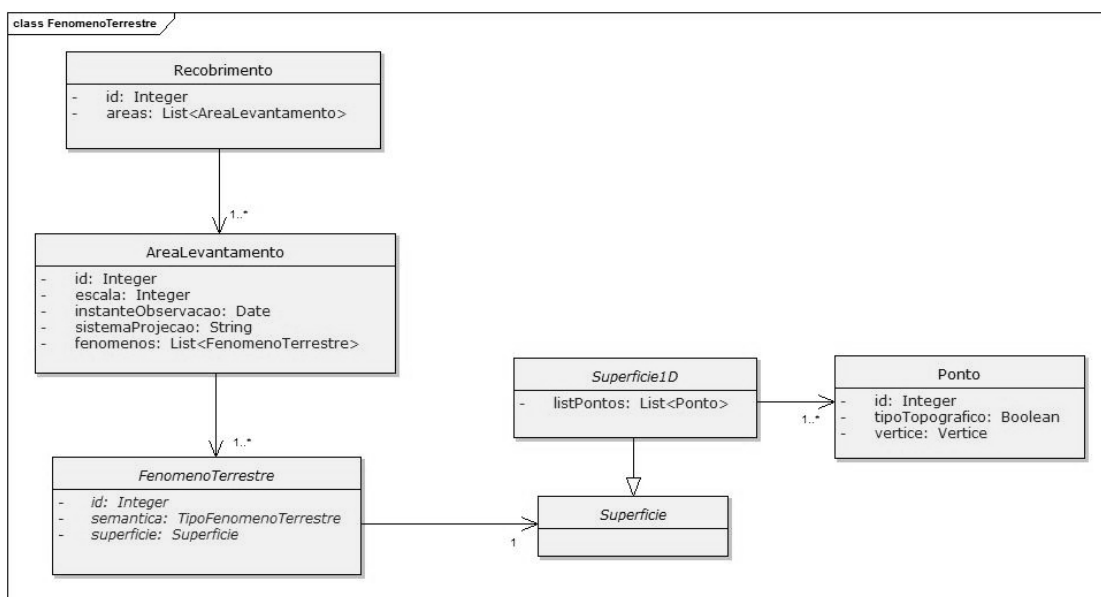


FIGURA 13 - DIAGRAMA DE CLASSES DE OBJETOS PARA FENOMENOS TERRESTRES
 FONTE: Adatado de VIEIRA (2006)

Ao analisar a classe abstrata *FenomenoTerrestre* (fig. 14) daquele modelo, observa-se que foi proposto a especialização desta classe em onze subclasses denominadas essenciais. Entre estas subclasses, algumas foram implementadas naquele trabalho para a realização dos experimentos, como *SuperficieTerrestre*, *SuperficieTopografica*, *Arvore*, *Luminaria* e *Edificacao*. As demais subclasses são sugeridas para implementações em trabalhos futuros (VIEIRA, 2006, p. 104), entre elas a subclasse *CorpoHidrico*. Corpos hídricos são definidos como:

“... contendo uma massa amórfica em estado líquido que assume a forma do talvegue (ou depressão) em que está contida. Esta massa líquida pode fluir livremente de acordo com o desnível do talvegue, ou então pode estar represada sobre parte da superfície terrestre. Exemplos de corpos hídricos são os oceanos, os lagos e os rios.” (VIEIRA, 2006, p. 46)

Assim, as futuras implementações de subclasses devem redefinir os atributos e operadores da classe abstrata *FenomenoTerrestre*. Complementarmente, novos membros poderão ser adicionados, em função da natureza do fenômeno a ser estudado, para cada subclasse especializada.

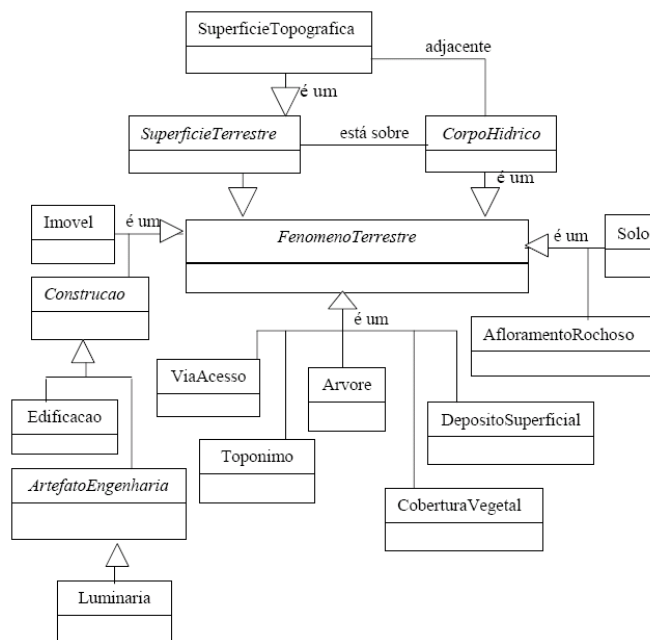


FIGURA 14 - AS ESPECIALIZAÇÕES DA CLASSE *FenomenoTerrestre*
 FONTE: VIEIRA (2004)

Quando a questão temporal é levada para a modelagem para representar a variabilidade de fenômenos ao longo do tempo, duas classes se destacam: classe *AreaLevantamento* e classe *Recobrimento*. A primeira congrega fenômenos observados num mesmo tempo e numa mesma escala e o levantamento apresenta um retângulo envolvente mínimo que contém todos os fenômenos observados (fig. 15). A segunda reúne um conjunto de objetos da classe *AreaLevantamento* em diferentes instantes. Assim, é importante observar que o tempo e a escala estão associados ao levantamento e não aos fenômenos em si, não necessitando de se explicitar estas duas grandezas para cada fenômeno individualmente.

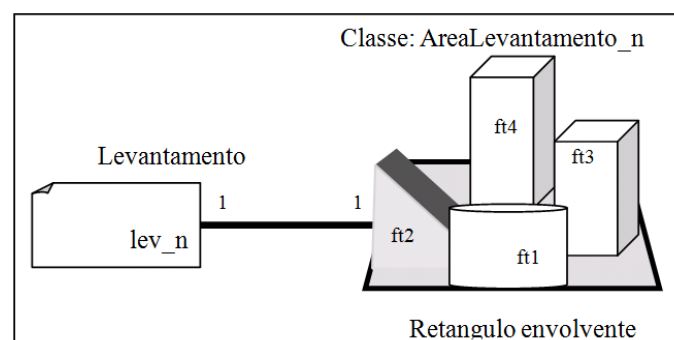


FIGURA 15 - CLASSE *AreaLevantamento* E FENÔMENOS TERRESTRES LEVANTADOS
 FONTE: VIEIRA (2004)

Um conjunto de objetos da classe *AreaLevantamento* para uma mesma região geográfica (fig. 16) forma uma série histórica de dados de levantamentos. Esta série histórica é formada por levantamentos instantâneos e não uniformes.

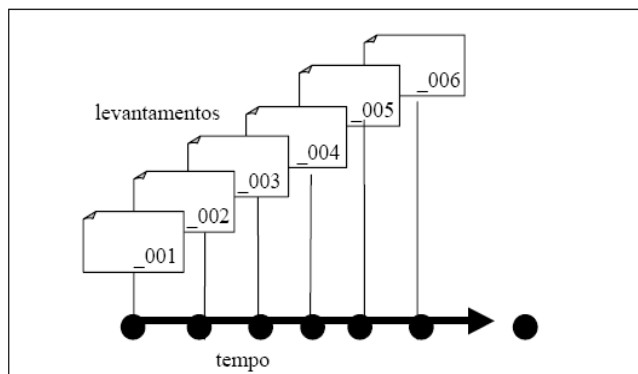


FIGURA 16 - ÁREAS DE LEVANTAMENTO COM O PASSAR DO TEMPO
FONTE: VIEIRA (2004)

As classes *Recobrimento* e *AreaLevantamento* estão representadas na figura 17 com os seus respectivos membros. Observa-se que o membro *areasLevantamento* na classe *Recobrimento* abriga um conjunto de objetos da classe *areaLevantamento* e esta classe define, entre outros, os membros *escala*, *instanteObservacao* e *conjuntoFenomenos*.

Recobrimento	AreaLevantamento
poligonosBasicos poligonosComplementares retanguloEnvolveinte numeroRecobrimento areasLevantamento	escala instanteObservação retanguloEnvolveinte registroDados conjuntoFenomenos

FIGURA 17 - MEMBROS DA CLASSE *Recobrimento* E DA CLASSE *AreaLevantamento*
FONTE: VIEIRA, 2004

2.5 ELEMENTOS E CARACTERÍSTICAS DE REDES DE DRENAGEM

Segundo Pinto *et al.* (1976, p. 36), corpos hídricos são formados pelo *escoamento superficial* das águas que tem origem fundamentalmente nas precipitações. Segundo os autores, este escoamento de águas é visto como uma

parte do ciclo hidrológico que estuda o deslocamento das águas na superfície da Terra. Este deslocamento ocorre por caminhos preferenciais, iniciando-se em canalículos até ganhar dimensões maiores na forma de pequenos córregos. É possível de se decompor uma rede de drenagem em alguns elementos e que, quando reunidos em formas interconectadas e distribuídos espacialmente, podem conferir algumas características que auxiliam na determinação e classificação de redes de drenagem.

2.5.1 Elementos de redes de drenagem

Laurini e Thompson (1998, p. 175) observam que conceitos de topologia e da teoria de grafos são valiosos para revelar a estrutura espacial de entidades vistas como pontos, linhas, áreas e sólidos, após considerados os detalhes de geometria. Estas relações não variam ao se aplicar transformações como escala e rotação. Ao se estudar redes, como as de drenagem e de transportes, os elementos dominantes são os objetos de dimensionalidade 0D que se restringem a um sub-conjunto de posições pré-determinadas.

Algumas propostas para a descrição dos elementos de redes de drenagem podem ser encontradas como em Scheidegger ⁴ (1970, *apud* Gontijo Junior e Koide, 2006) e Teixeira *et al.* (2007). Tomando-se por base, a descrição sugerida pelos últimos autores que posteriormente será adaptada na condução metodológica deste trabalho, tem-se:

Nascente: representação das nascentes dos cursos d'água;

Foz: representação das fozes de cursos d'água que deságuam no mar;

Confluência: representação das fozes de cursos d'água que não deságuam no mar;

Confluência-foz: representação de todas as fozes de cursos d'água;

⁴ SCHEIDEGGER, A. E. *Theoretical Geomorphology*. 2ª ed. New York: Springer-Verlag, 1970, 435p.

Curso d'água: junção de trechos de curso d'água que segue da foz à cabeceira utilizando como critério a maior área a montante a partir de cada confluência;

Trecho de curso d'água: segmento entre uma foz e sua confluência, ou segmento entre confluências, ou segmento entre uma confluência e sua nascente;

Rio: junção de trechos de curso d'água contínuos que possuem a mesma toponímia.

Para ilustrar as definições anteriores, a figura 18 apresenta os elementos de uma rede de drenagem com a seguinte simbologia: os círculos (azul) representam as nascentes dos trechos de cursos d'água (total de quatro), os quadrados (verdes) representam as confluências (total de três) e o triângulo (vermelho) indica a foz da rede. Neste exemplo contabiliza-se também um total de sete trechos de cursos d'água e quatro cursos d'água (caminhos contínuos entre uma nascente e a foz), um deles representado em tom laranja.

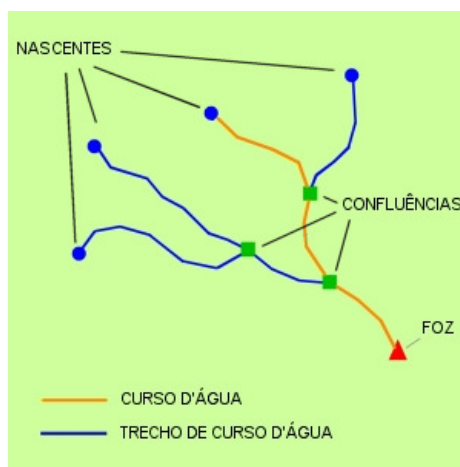


FIGURA 18 - ELEMENTOS DE REDE DE DRENAGEM
FONTE: O autor (2008)

2.5.2 Características físicas de redes de drenagem

Ao se estudar redes de drenagem, algumas características se destacam em função de seus elementos e de seus relacionamentos com a superfície topográfica onde ocorrem e entre si. Estas características auxiliam na percepção da localização espacial, na classificação de seus elementos e na comparação de parâmetros físicos entre as redes de drenagem ou mesmo entre a própria rede de drenagem e

sua série temporal. De acordo com Cristofolletti⁵ (1974, *apud* LIMA, 1996, p. 57), a distribuição espacial das redes de drenagem propicia a existência de padrões de drenagem, sendo que a maior parte desses padrões é condicionada à geologia da região. Estes padrões (fig. 19) podem ser assim classificados:

- a) dendrítico: (*tree-like*) ocorrem em terras altas nas quais o regolito e a rocha mãe oferecem uma resistência relativamente uniforme à erosão. As encostas não têm orientação dominante;
- b) treliça: em regiões onde rochas de resistência desigual estão dispostas em dobras ou colinas longas ou em áreas de topografia pouco acentuada e resistência relativamente uniforme (planícies costeiras). Os canais de drenagem longos fazem confluências com tributários de canais curtos em ângulos retos com o curso maior;
- c) retangular: é uma modificação da drenagem em treliça. É o padrão de áreas de falhas onde os cursos seguem as linhas de falha. A drenagem é condicionada pelas estruturas das rochas;
- d) paralelo: lembra a forma dendrítica mas os ramos pouco antes de suas junções com os canais principais seguem por caminho paralelo boa parte dos trechos;
- e) radial: caracterizado por talvegues que se dispõem radialmente a uma estrutura ou região mais elevada. Ocorre em estruturas vulcânicas.
- f) anelar: padrão caracterizado por um drenagem radial e alguns cursos que se colocam como segmentos de arcos ao redor de um ponto mais elevado a montante da drenagem radial. É um padrão onde uma drenagem radial se associa a uma drenagem concêntrica devidos a estruturas concêntricas.

⁵ CRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blucher e EDUSP, 1974. 149 p.

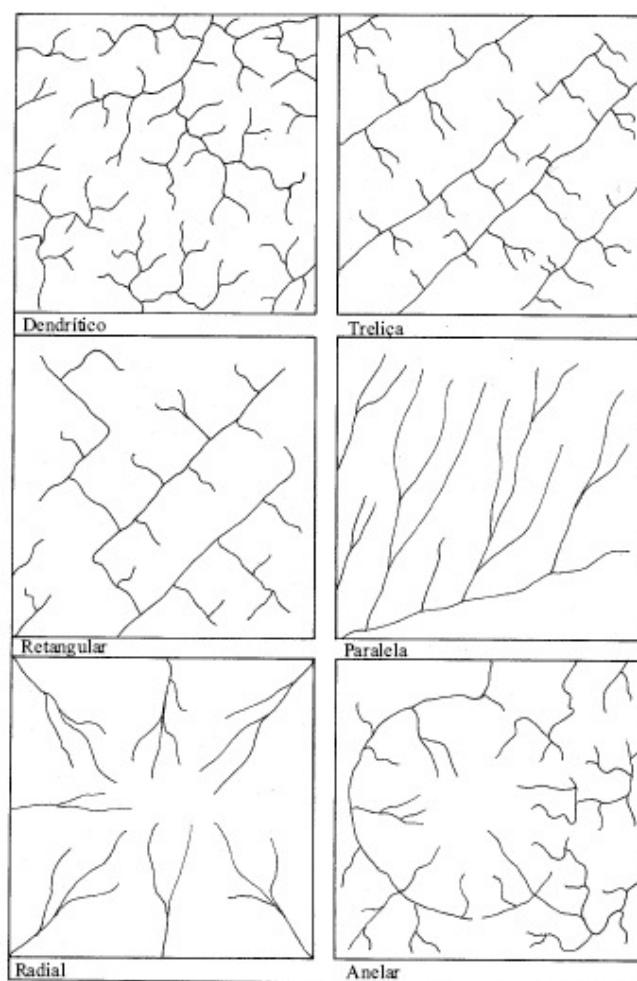


FIGURA 19 - PADRÕES DE DRENAGEM
 FONTE: CRISTOFOLETTI (1974)

Na literatura são encontrados diversos índices e relações empíricas que procuram caracterizar uma bacia de drenagem. Entre as principais características fisiográficas de uma bacia, estão: área da bacia de drenagem, comprimento e declividade do canal mais longo ou canal principal, declividade e comprimento dos afluentes, rugosidade do canal, tipo do recobrimento vegetal e distância entre o fim do canal e o espigão (PINTO *et al.*, 1976, p. 139-140). Lima (1996, p. 58) descreve também outras características: compacidade, densidade de drenagem, altitude média, declividade média, orientação, rugosidade dos canais e índice de circularidade.

Na literatura, os termos “bacia de drenagem” e “bacia hidrográfica” são utilizados de forma intercambiável e não há, a princípio, uma diferenciação para estes termos. Uma bacia de drenagem pode ser definida como “a área de drenagem

de um curso d'água ou lago" (BACIA HIDROGRÁFICA, 2006). A área de drenagem de uma bacia (A), relacionada a um determinado ponto de um canal ou em relação ao nó foz, pode ser definida como a área projetada sobre uma superfície horizontal plana delimitada pelos seus divisores topográficos a montante do ponto considerado. É o elemento básico para o cálculo de outras características físicas e normalmente é expressa em km^2 ou hectares.

Uma indicação do grau de desenvolvimento de um sistema de drenagem é a densidade de drenagem (D_d). Este parâmetro físico é importante, pois está relacionado com o grau de influência da geologia, topografia, cobertura vegetal e com o tempo gasto para o escoamento superficial da área de drenagem. Pode ser definida como:

$$D_d = \text{densidade de drenagem} = \frac{\text{comp. total dos cursos d'água}}{\text{área de drenagem}}, \text{ em } \frac{\text{km}}{\text{km}^2} \quad (4)$$

Aparentemente, parece não haver um consenso na literatura quanto à classificação de regiões segundo a densidade de drenagem. Segundo Villela e Mattos⁶ (1975, *apud* TONELLO *et al.*, 2006), esse índice pode variar de 0,5 km/km^2 para regiões com drenagem pobre a 3,5 km/km^2 ou mais, para regiões excepcionalmente bem drenadas. Por outro lado, Strahler⁷ (1957, *apud* LIMA, 1996, p. 62) emprega outra classificação: baixa (até 5,0 km/km^2), média (entre 5,0 e 13,5 km/km^2), alta (entre 13,5 e 155,5 km/km^2) e muito alta (acima de 155,5 km/km^2).

De uma outra forma, a densidade de confluências (D_c) pode ser expressa como a razão entre o número de confluências encontradas na rede de drenagem pela área da bacia de drenagem. Esta medida caracteriza o grau de ramificação de uma rede de drenagem.

Outra grandeza importante presente nas características físicas de uma bacia hidrográfica é o comprimento de um canal (L), que pode ser expresso como a soma dos comprimentos de trechos de canais. Esta grandeza, juntamente com a declividade, é utilizada em Hidrologia para o cálculo da determinação do tempo de

⁶ VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245 p.

⁷ STRAHLER, A. N. **Quantitative analysis of watershed geomorphology**. *Trans. American Geophysical Union*, 38, 1957. p. 913-920.

concentração de uma bacia, ou seja, o tempo necessário para que toda a área de drenagem passe a contribuir para a vazão na seção estudada da rede de drenagem (PINTO *et al.*, 1976, p. 139-140).

A declividade do terreno é expressa como a variação de altitude entre dois pontos do terreno, em relação à distância que os separa. Esta declividade pode ser expressa em percentual (%) ou numa relação entre unidades de comprimento entre altitude e distância, como (m/km). EMBRAPA⁸ (1979, *apud* TONELLO *et al.*, 2006) preconiza seis intervalos distintos de declividades, de acordo com a tabela 2:

TABELA 2 - INTERVALOS DE DECLIVIDADE DO TERRENO

Declividade (%)	Descrição
0 – < 3	Relevo plano
3 – < 8	Relevo suave ondulado
8 – < 20	Relevo ondulado
20 – < 45	Relevo forte ondulado
45 – < 75	Relevo montanhoso
>= 75	Relevo forte montanhoso

FONTE: EMBRAPA (1979)

Alguns índices de formas de bacias hidrográficas são encontrados na literatura e normalmente sugerem a tendência de inundação que uma bacia pode ter. Entre eles, citam-se dois: o Fator de Forma (Ff) proposto por Horton⁹ (1932, *apud* LIMA, 1996, p. 53) e o Índice de Circularidade (IC) proposto por Miller¹⁰ (1953, *apud* LIMA, 1996, p. 62). O primeiro relaciona a área da bacia (A) com o comprimento do maior eixo da bacia (L_{max}), medido como a distância entre o nó foz e o ponto mais longínquo do espigão. Este índice pode dar indicações sobre a

⁸ EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos**. In: REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10., 1979, Rio de Janeiro. 83 p.

⁹ HORTON, R.E., 1932. **Drainage Basin Characteristics**. Trans. American Geophysical Union, 13: 350-361.

tendência de inundações numa bacia. Assim, quanto maior for o fator de forma, maior a possibilidade de inundações. Esta relação é dada pela seguinte expressão:

$$Ff = \frac{A}{L_{\max}^2} \quad (5)$$

O segundo estabelece a relação da área da bacia com o seu perímetro (P). Quanto mais próximo de 1,0 estiver este índice, mais próximo da forma circular estará a bacia de drenagem. É expresso pela fórmula:

$$IC = 12,57 \frac{A}{P^2} \quad (6)$$

sendo 12,57 o parâmetro de conversão área/perímetro.

2.5.3 Hierarquização da rede de drenagem e métodos de ordenamento

Análises de redes de drenagem consideram uma rede como uma “árvore” com a sua “raiz” tomada no ponto mais a jusante do fluxo da rede considerada. Estas análises usam a quantidade de trechos a montante deste ponto, como uma medida da importância dos trechos nesta “árvore”. Teixeira *et al.* (2007) comentam que a hierarquização fluvial estabelece a classificação de determinado curso d’água ou da área drenada que lhe pertence, no conjunto total de sua bacia hidrográfica. O ordenamento de redes de drenagem confere um nível de significado a cada canal, possibilitando uma sistematização da codificação de seus elementos.

De acordo com McAllister (1999, p. 16-17), três métodos de ordenamento de redes de drenagem se destacam: método de Strahler, método de Horton e o método de Shreve (fig. 20). No método de Strahler, o canal principal não mantém sempre a mesma ordem ao longo de toda a sua extensão e a rede de canais pode ser decomposta em segmentos discretos cujas áreas de contribuição formam a própria bacia de drenagem. A ordem dos canais de drenagem pode ser definida como a hierarquização dos vales de uma bacia de drenagem em 1ª ordem (vales

¹⁰ MILLER, V.C. **A quantitative geomorphic study of drainage basins characteristics in the Clinch Mountain area**. Technical Report (3). Dept. Geology Columbia University, 1953.

mais elevados e sem tributários), 2ª ordem (a jusante da confluência de 2 ou mais tributários de 1ª ordem), 3ª ordem (a jusante da confluência de 2 ou mais tributários de 2ª ordem) e, assim, sucessivamente, sendo que um tributário de ordem "n" pode desembocar em outro de ordem maior que "n+1".

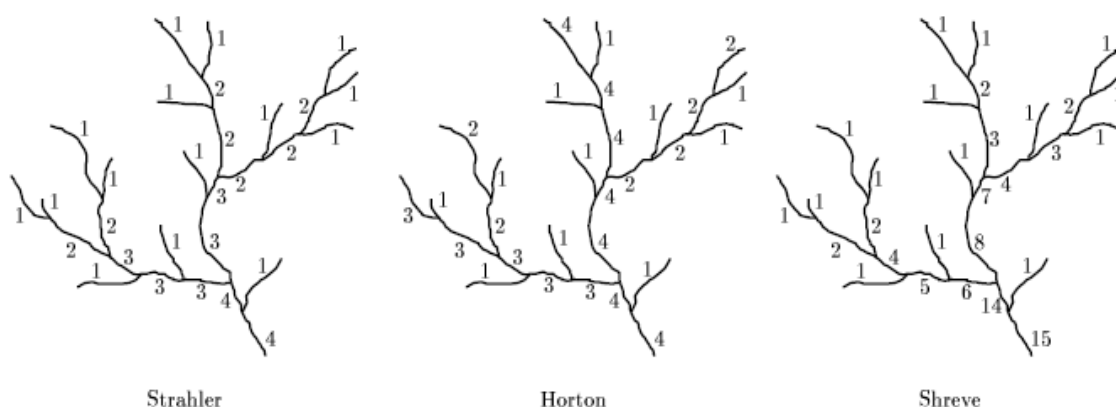


FIGURA 20 - MÉTODOS DE ORDENAMENTO HIDROLÓGICO
FONTE: McALLISTER, 1999.

No método de Strahler, o ordenamento confere grau "1" para os trechos de canais que partem dos nós nascentes e este valor é alterado quando dois trechos se encontram numa confluência, recebendo novo valor. Algebricamente, se o encontro de dois trechos de graus N e P for denotado por "&" segue-se (GONTIJO JUNIOR; KOIDE, 2006, p. 4):

$$N \& P = N + 1 \text{ se } N = P \quad (7)$$

$$N \& P = \max (N, P) \text{ se } N \neq P \quad (8)$$

O método de Horton utiliza o mesmo método de Strahler, a fim de identificar a maior ordem de trecho de canal de drenagem. No entanto, após esta determinação, o algoritmo segue no sentido inverso, a montante, renumerando o próximo trecho do canal com o valor da mais alta ordem obtida para o trecho pertencente ao caminho mais longo a montante. Caso o trecho a montante não pertença ao caminho mais longo, este trecho permanece com a ordem de Strahler. Todos os trechos de canais que receberam a mais alta ordem formam o canal de drenagem principal.

No método de Shreve, a ordem de cada trecho de canal de drenagem é obtida somando-se a ordem dos trechos de canais a montante que contribuíram para o trecho em questão. Algebricamente, a relação pode ser expressa como:

$$N \& P = N + P, \text{ para quaisquer } N \text{ e } P \quad (9)$$

Shreve chamou esta ordem de magnitude (M) da rede de drenagem, em relação a um determinado nó foz, como sendo o número de nós nascentes da rede. No entanto, na literatura é possível identificar diferentes métodos para definição da magnitude (GONTIJO JUNIOR; KOIDE, 2006, p. 5).

2.5.4 Extração de redes de drenagem

Delazari (1996, p. 35-49) cita o desenvolvimento de técnicas automáticas para extrair, armazenar e prover medidas a respeito das redes de drenagem diretamente a partir dos modelos digitais de terreno (MDT). Segundo Weibel e Heller (1991, p. 269-297) os MDT se constituem de elementos fundamentais em SIG, auxiliando na modelagem, análise e visualização da superfície da Terra.

A extração de redes de drenagem é um processo que pode empregar diferentes abordagens, conforme a natureza da entrada seja proveniente de modelos digitais, imagens de satélites, imagem radar, imagem fotogramétrica, mapa digitalizado, entre outras. Alguns anos atrás, o processo de extração era bastante trabalhoso pois como não havia num só produto a solução completa, vários softwares eram utilizados num sequenciamento manual de etapas (DELAZARI, 1996, p. 50-87). Atualmente, é possível encontrar softwares de SIG com o processo de extração consolidado num único ambiente. No apêndice 2 encontra-se um resumo dos passos do processo de extração de uma rede de drenagem no ambiente ArcGIS®, que foi utilizado como opção para a obtenção de dados para a realização de um dos experimentos deste trabalho.

2.5.5 Aplicações que empregam redes de drenagem

Modelos de redes de drenagem podem ter especial utilidade em aplicações como:

- a) gestão de recursos hídricos (TEIXEIRA *et al.*, 2007);
- b) manejo de recursos hídricos (HOTT *et al.*, 2007);
- c) outorgas de bacias hidrográficas (ZEILHOFER *et al.*, 2007);
- d) na identificação de problemas ambientais;
- e) no diagnóstico de condições de qualidade da água (SOUZA, 2004);
- f) na execução de obras hidráulicas (PINTO *et al.*, 1976);
- g) nas relacionadas com geologia para determinação de nível de permeabilidade do solo;
- h) na agricultura para estudo no transporte de poluentes;
- i) em ecologia e geotecnia no estudo de erosão de solo a partir de cálculo de tamanho de rampas.

Um possível grupo de aplicações, que necessitam de um modelo de redes de drenagem, é aquele que utiliza além dos atributos não-espaciais, a topologia (conexões e caminhos pela rede), formando-se o que é chamado de unifilar topologicamente consistente (TEIXEIRA *et al.*, 2007). Estudos detalhados sobre a determinação deste unifilar equivalente podem ser encontrados em (McALLISTER, 1999, p. 21-23). Assim, essa consistência é assegurada com todos os segmentos de drenagem conectados (o nó sendo o elemento de conexão) em seus afluentes ou efluentes. Esta topologia linearmente conectada é definida por uma relação arco-nó representada vetorialmente. Estes segmentos lineares são formados por um par de coordenadas. Se for considerada a questão hidrológica, algumas simplificações no entanto podem ser necessárias, por exemplo: se parte desta rede de drenagem apresentar uma forma de polígono (caso de um lago, de uma represa ou rio com margens duplas), esta deve ser substituída por um arco passando preferencialmente de modo equidistante ao longo de seu eixo maior. Em outros tipos de aplicações, além da topologia, podem ser necessárias características e fatores como seção transversal, grupo hidrológico do solo, tipo de cobertura superficial, tipo de tratamento e condição de umidade antecedente, declividade, rugosidade e delimitação das margens. Isto implica na necessária compatibilização com o nível de

detalhe requerido elevando-se o problema para uma complexidade ainda maior (BARRETO NETO; SOUZA FILHO, 2007, p. 3288).

2.6 CARACTERÍSTICAS DA MODELAGEM ORIENTADA A OBJETOS

Segundo Navathe (1992, p. 112-123) um modelo de dados semântico deve possuir características como:

- a) expressividade: o modelo deve permitir distinguir tipos de dados, relacionamentos e restrições, incluindo os três mecanismos de abstração: classificação, agregação e generalização;
- b) simplicidade: o modelo deve permitir a construção de diagramas em diferentes níveis de detalhe, facilitando o entendimento e usabilidade;
- c) minimalidade: nenhum conceito do modelo pode ser descrito pelos demais. O modelo deve expressar conceitos básicos, diretos e distintos;
- d) formalidade: o modelo deve ter seus conceitos formalmente definidos, com interpretação única, precisa e bem-definida.

Booch, Rumbaugh e Jacobson (2006, p. 6, 11) enumeram quatro objetivos que a modelagem pode atingir: (1) os modelos ajudam a visualizar o sistema como ele é ou como se deseja que seja; (2) os modelos permitem especificar a estrutura ou o comportamento de um sistema; (3) os modelos proporcionam um guia para a construção do sistema; (4) os modelos documentam as decisões tomadas.

Segundo os mesmos autores, pode-se definir um modelo de software de várias maneiras. As duas mais comuns são provenientes da perspectiva da execução de um algoritmo ou da perspectiva orientada a objetos. Na primeira visão, o principal bloco de construção do software é o procedimento ou a função que descreve passos de execução controlada. O foco neste tipo de construção está na atenção dada ao controle e à decomposição funcional de procedimentos. À medida que os requisitos se alteram e o sistema cresce em complexidade, a manutenção se torna mais difícil podendo o sistema se tornar instável. Na segunda visão, a de orientação a objetos, o principal bloco de construção é o objeto ou a classe do objeto. De forma resumida, um objeto é visto como algo estruturado a partir da semântica do espaço do problema ou do espaço da solução; uma classe é vista

como um “molde” que constrói aquele objeto, permitindo-se criar vários objetos a partir da mesma classe. Estes objetos possuem: (a) uma identificação que o tornam únicos em relação aos outros; (b) um estado do objeto na forma de um conjunto de atributos associados a ele e (c) um comportamento regulando o que se pode fazer com o objeto ou o que o objeto pode fazer com outros objetos. Na visão de orientação a objetos, se persegue baixo acoplamento (*loose coupling*), definido como responsabilidade comparativamente pequena e bem definida que os objetos que interagem têm um para com o outro (METSKEER, 2004, p. 385) e, ao mesmo tempo, a alta coesão, ou seja, baixa diversidade de “tópicos” abordados na mesma classe, possibilitando aumentar o grau de clareza e compreensão do projeto, conferindo grau de independência maior e o grau de usabilidade de uma classe, além de diminuir a instabilidade no sistema decorrentes de manutenção.

2.6.1 Modelos de dados

Aspecto fundamental no projeto de um SIG, o modelo de dados descreve como a realidade geográfica será representada no computador. Um modelo de dados é um conjunto de ferramentas conceituais utilizado para estruturar dados num sistema computacional e unificar diferentes visões sobre os dados (CHEN, 1976, p. 9). Chen propôs um modelo de dados que denominou “Modelo de Entidade-Relacionamento” (*entity-relationship model*), com a finalidade de capturar informações importantes da semântica do mundo real. Esta semântica é evidenciada na estrutura de entidades e de seus atributos, assim como nas relações entre as próprias entidades. Este modelo deve ser projetado com extremo cuidado, pois sendo a base estrutural para os dados de um sistema, poderá permitir o crescimento futuro do sistema, como também ser um fator limitante para tal evolução.

Kösters, Pagel e Six (1996, p. 5) ponderam que um modelo adequado para trabalhos com redes envolvendo uma grande quantidade de dados é um compromisso entre precisão e completude (capacidade de expressar sucintamente o fato de forma completa) por um lado, com a legibilidade (facilidade de leitura pelo usuário) e entendimento, de outro.

2.6.2 Orientação a objetos

Resumidamente, cada entidade de um modelo de dados pode ser vista como um objeto. Um objeto é criado a partir de uma classe e é dito que ele é uma instância de uma classe. Uma classe pode ser vista como uma definição de um novo tipo de dados. A definição de uma classe consiste de um nome de identificação da classe e de um corpo que contém um conjunto de membros. Os membros de uma classe podem incluir dados (atributos) que são armazenados em campos e estão fortemente associados a procedimentos codificados organizados em métodos que descrevem operações ou comportamentos. Uma classe pode ser dita abstrata quando a classe for definida de forma que seus membros serão utilizados por outras classes mais especializadas, ditas subclasses. Uma classe abstrata não pode ser instanciada mas estendida por outras classes. Uma das vantagens do uso de objetos é que objetos encapsulam campos e métodos. Assim, objetos podem esconder detalhes da implementação de outros objetos, mantendo apenas interfaces bem-definidas para comunicação entre eles (DEITEL; DEITEL, 2003, p. 68). Estes detalhes de implementação podem ser modificados ou evoluídos ao longo do tempo sem que impactem nos demais objetos de outras classes, desde que as interfaces de comunicação mantenham-se as mesmas. Estes campos e métodos apresentam dois tipos distintos: membros de classe (conhecidos também como membros estáticos) associados à própria classe e membros de instância associados a instâncias individuais da classe. Membros de classes definem campos e operações que são comuns a todas as instâncias da classe e há somente uma cópia deles para compartilhamento geral. Membros de instância, ao contrário, pertencem a cada instância da classe e existem tantas cópias deles quantas as instâncias criadas. As definições de campo podem também incluir modificadores de acesso. Esses modificadores especificam se e onde um campo pode ser utilizado fora da classe que o define, e são fundamentais para prover ocultamento e encapsulamento de dados. Classes podem ter um ou mais construtores para inicializar campos de uma instância criada. Um construtor nada mais é que um método de mesmo nome da classe, definindo uma lista de parâmetros para a inicialização de campos da instância (FLANAGAN, 2006, p. 110-116).

2.6.3 A linguagem de modelagem unificada (UML)

A UML é uma linguagem-padrão que define as regras e notação para especificar sistemas de software orientado a objetos. Especificar, neste contexto, significa construir modelos precisos, sem ambiguidades e completos (BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 2006, p. 15). A UML não é um processo prescritivo para o desenvolvimento de software. Ela não fornece um método ou processo, mas simplesmente uma linguagem que pode ser empregada numa variedade de modos e combinações de diagramas para especificar e desenvolver um projeto de software, possibilitando oferecer comunicação entre o projetista do modelo e o usuário, e entre o projetista e o implementador do modelo. A UML independe de linguagens de programação e independe de métodos de desenvolvimento. A notação oferece um conjunto rico de elementos gráficos para a modelagem de elementos orientados a objetos e as regras informam como estes elementos podem se conectar entre si e como podem ser utilizados (SPARX SYSTEMS, 2006).

O processo de desenvolvimento de software pode ser visualizado em diferentes perspectivas para facilitar o exame e estudo por parte dos desenvolvedores e demais participantes do projeto. Estas perspectivas poderão ser utilizadas na medida que a complexidade do software as determine. A arquitetura de um sistema complexo de software pode ser descrita mais adequadamente por cinco visões interligadas (fig.21), cada visão enfatizando aspectos diferentes, como estruturais e comportamentais, do mesmo sistema de software (BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 2006, p. 10, 34-35).

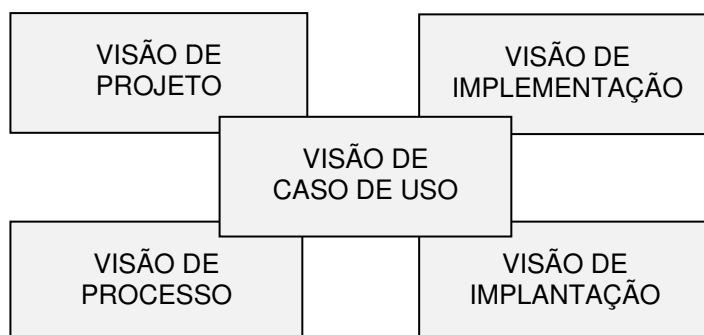


FIGURA 21 - AS CINCO VISÕES DE UM SISTEMA DE SOFTWARE
FONTE: BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON (2006)

Em geral, a primeira visão trabalhada ao se estudar um sistema é a visão de caso de uso e direciona o desenvolvimento das outras visões do sistema. Ela abrange os casos de usos que descrevem o comportamento do sistema conforme é visto pelos seus usuários finais. Ela também ajuda na elaboração de casos de testes a serem desenvolvidos posteriormente para se validar o sistema. Esta visão responde a pergunta “o que será tratado?”. Esta visão define um “contrato” entre os desenvolvedores e os demais interessados no projeto, relacionando o que será desenvolvido e o que ficará de fora do sistema. A visão de projeto abrange as classes, interfaces e colaborações que formam o vocabulário do problema e de sua solução. Ela descreve os aspectos que dão suporte tecnológico, estrutural e comportamental às funcionalidades externamente visíveis do sistema. A visão de implementação trata do modo de como o sistema será estruturado, versionado e gerenciado. A visão de implantação descreve o plano de como o sistema será distribuído fisicamente e liberado nas plataformas de operação, incluindo as conexões entre as diversas partes. Finalmente, a visão de processo realça as características internas de desempenho, sincronização e concorrência do sistema.

2.6.4 Diagramas da UML

De acordo com o Object Management Group (2005), a UML apresenta 13 tipos de diagramas diferentes classificados em dois grandes grupos (fig. 22): diagramas estruturais (*Structure diagrams*) e diagramas comportamentais (*Behavior diagrams*). Os elementos num diagrama estrutural representam conceitos relevantes de uma aplicação e podem incluir conceitos abstratos, do mundo real e de implementação. Diagramas comportamentais apresentam o comportamento dinâmico de objetos num sistema, incluindo seus métodos, colaborações, atividades e histórico de mudança de estados. O comportamento dinâmico de um sistema pode ser descrito como uma série de mudanças ocorridas no sistema ao longo do tempo. Esta taxonomia fornece uma organização lógica dos vários tipos de diagramas (OBJECT MANAGEMENT GROUP, 2005). Dependendo do domínio do tipo de sistema que se precise modelar, o projetista pode lançar mão de uma combinação

destes diagramas que não inclua necessariamente todos, para o entendimento do sistema, a captura de requisitos e a proposição do modelo para construção.

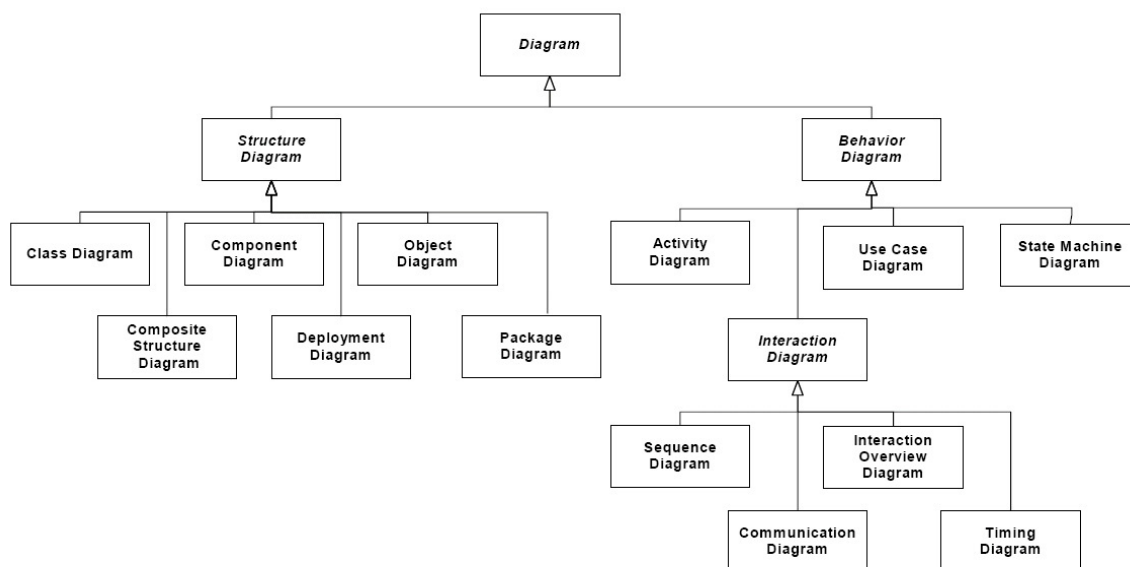


FIGURA 22 - DIAGRAMAS DA UML

FONTE: OBJECT MANAGEMENT GROUP (2005)

NOTA: UML 2.1.1 Superstructure, ap.A-5 The taxonomy of structure and behavior diagram, pg. 694

2.6.5 Vantagens no emprego da UML para a construção de modelos

A UML é uma linguagem recomendada na modelagem de sistemas e diversas ferramentas de *CASE* (Computer Aided Software Engineering) a implementam para oferecer, além da modelagem, um meio de comunicação entre os interessados no projeto e os desenvolvedores do sistema, e um meio de ligação bidirecional entre o modelo e a implementação. Assim, diz-se que a ferramenta pode gerar código básico de programação na linguagem de programação alvo (preferivelmente orientada a objetos) da escolha do implementador e por reengenharia reversa, a partir do código alterado, atualizar partes do modelo (BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 2006, p. 16). Outra funcionalidade útil destas ferramentas é a capacidade de geração de diagramas de entidades-relacionamentos a partir de diagramas de classes de objetos e consequente geração de *scripts*, blocos de códigos escritos em linguagem DDL (*Data Descriptor Language*) para a criação e manutenção de tabelas em bancos de dados relacionais (SPARX SYSTEMS, 2006).

A seleção pela UML como linguagem de modelagem neste trabalho, foi considerada pelas seguintes razões:

- a) linguagem e notação simbólica simples, universal, além de ser extensível;
- b) conjunto de diagramas que cobrem aspectos estáticos e dinâmicos da modelagem;
- c) utilização tradicional no desenvolvimento de software utilizando programação orientada a objetos;
- d) independente de métodos de desenvolvimento e de linguagens de programação específicos;
- e) treinamento e suporte continuados pela comunidade;
- f) existência de diversas ferramentas de software que implementam muitas das características preconizadas na UML.

2.6.6 Diagramas de casos de uso

Diagramas de casos de uso são diagramas da UML que procuram representar o que será tratado no sistema. Eles têm um papel central para a modelagem do comportamento de um sistema (BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 2006, p. 98, 241-242) e formam a base para o desenvolvimento dos demais diagramas. Os diagramas de casos de uso auxiliam na comunicação entre usuários finais do sistema, especialistas de domínio e desenvolvedores para a visualização, especificação, construção e documentação de decisões sobre requisitos funcionais do sistema. Um diagrama de casos de uso normalmente é representado por um retângulo mais externo que define a fronteira do sistema. No interior deste retângulo, os demais casos de uso integrantes do caso de uso maior são representados em forma de elipses. Na parte exterior ao retângulo, representam-se os atores que irão interagir com o sistema, sobre os quais não se tem controle, podendo ser uma classe de pessoas, instituições ou mesmo outro sistema ou processo externo. Descrevem-se também neste diagrama, na forma de linhas, os relacionamentos que

podem existir entre atores e casos de uso, e entre os próprios casos de uso. A figura 23 ilustra este tipo de diagrama.

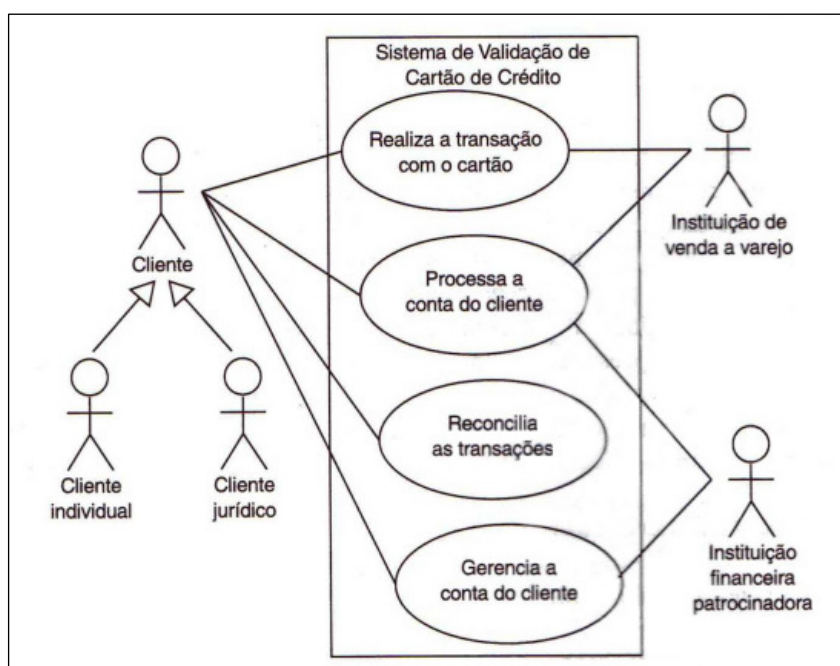


FIGURA 23 - EXEMPLO DE DIAGRAMA DE CASOS DE USO

FONTE: BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 2006

Em modelagem de sistemas mais complexos, acima de uma dúzia de casos de uso, estes podem ser expandidos separadamente para sucessivamente descrever a funcionalidade, mantendo-se a legibilidade (BEZERRA, 2003, p. 64). Eles não devem procurar descrever uma possível solução do problema, mas sim descrever o escopo levantado do sistema.

2.6.7 Diagramas de classes

Diagramas de classes são diagramas da UML que procuram representar os aspectos estáticos e estruturais das classes, interfaces, colaborações e seus relacionamentos (BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 2006, p. 96). Estes diagramas são utilizados na construção do modelo de classes desde o nível de análise até o nível de especificação. De todos os diagramas da UML, esse é o mais rico em termos de notação (BEZERRA, 2003, p. 97). A figura 24 ilustra este tipo de diagrama.

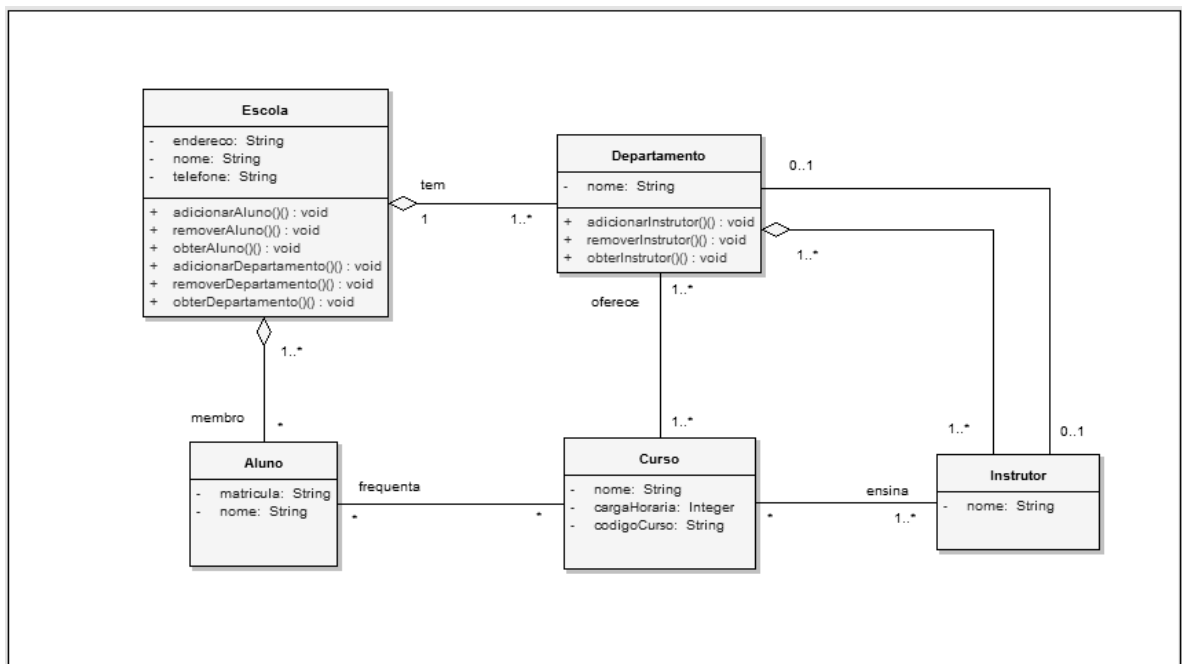


FIGURA 24 - EXEMPLO DE UM DIAGRAMA DE CLASSES
 FONTE: BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 2006

Uma classe é uma descrição de uma coleção de dados e de um código para operar sobre esses dados. Os dados são armazenados em campos e o código é organizado em métodos. Campos e métodos são chamados genericamente de membros. Membros podem ser de dois tipos distintos: membros de classe e membros de instância. Os primeiros estão associados à própria classe em si, são ditos estáticos e são comuns a todos os objetos instâncias dessa classe. Por esta razão são chamados de membros globais. Os segundos estão associados individualmente a cada instância de objeto da classe e não são em geral compartilhados com outros objetos da mesma classe (FLANAGAN, 2006, p. 110-116). De acordo com Booch, Rumbaugh e Jacobson (2006, p. 52-53), campos e métodos também são denominados atributos e operações respectivamente.

Conforme exemplo da figura 25, as classes são representadas na UML por retângulos e são divididos, na forma completa de visualização, em três blocos: no bloco superior representa-se o nome da classe, no bloco intermediário os atributos da classe e no bloco inferior as operações da classe (BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 2006, p. 49-55).

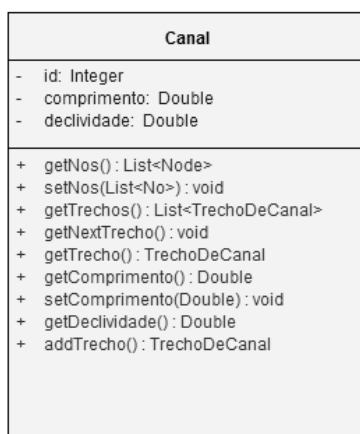


FIGURA 25 - EXEMPLO DE CLASSE EM UML

FONTE: O autor (2008)

De acordo ainda com este exemplo, todo objeto canal tem como atributos, um *id* ou identificador, um comprimento e uma declividade. Na simbologia da figura 21, notam-se dois sinais de prefixos que qualificam a visibilidade dos membros. O sinal de menos (“-”) denota que o membro é privado (*private*) e portanto visível somente ao objeto em particular da classe. O sinal de mais (“+”) torna o membro público (*public*) e portanto visível a qualquer outro objeto, tanto da mesma classe como de outra classe qualquer (BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 2006, p. 122, 125-126). O nome da classe, em geral, é o nome de um substantivo colhido a partir do vocabulário do sistema, cuja modelagem está sendo feita. Tipicamente começa com uma letra maiúscula e pode ser um nome composto de mais de uma palavra, como por exemplo *TrechoDeCanal*. Um campo é uma propriedade nomeada de uma classe, que descreve o intervalo de valores que a propriedade pode apresentar nas instâncias de objetos daquela classe. Pode-se dizer que o campo é uma abstração do tipo de dados ou estados que os objetos da classe podem abranger. Campos também podem guardar semânticas de agregação (relacionamentos) existentes entre classes. A UML possibilita que se especifique a maneira de como o campo pode ser lido, escrito e compartilhado com todos os objetos da classe ou por outros objetos de classes diferentes.

Em geral, os campos da classe não devem estar visíveis diretamente para leitura ou gravação a partir de outros objetos, mas sim por meio de métodos da classe do objeto. Campos são normalmente definidos com a primeira letra em minúscula. Uma operação é a implementação de um serviço que pode ser solicitado por algum objeto da classe para modificar o comportamento. Muitas vezes, é pela

chamada a uma operação de um objeto, que dados do objeto ou do estado do objeto podem ser alterados. Operações tipicamente referem-se a um verbo ou a uma locução verbal, podem ser parametrizadas e aparece como maiúsculo o primeiro caractere de cada palavra existente no nome da operação, exceto a primeira letra. A UML possibilita que se especifique outras características da operação, como visibilidade e assinatura, esta contendo o nome, o tipo e o valor-padrão de todos os parâmetros e o tipo a ser retornado, no caso da operação ser uma função. Booch, Rumbaugh e Jacobson (2006, p. 54) notam que não é preciso exibir todos os atributos e operações ao mesmo tempo na figura da classe. Na maioria das vezes, isto não é possível numa mesma figura e nem adequado (subconjunto relevante para uma determinada visão).

2.6.8 Diagramas de atividades

Diagramas de atividades são diagramas da UML que retratam o fluxo de controle de uma atividade para a outra sendo portanto utilizados para a modelagem de aspectos dinâmicos do sistema. Uma atividade é definida como uma execução não-atômica em andamento em uma máquina de estados, que resulta em uma mudança de estado do sistema ou o retorno de um valor (BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 2006, p. 270). Exemplo deste diagrama é dado pela figura 26. Estes diagramas são úteis para modelar membros operadores de uma classe.

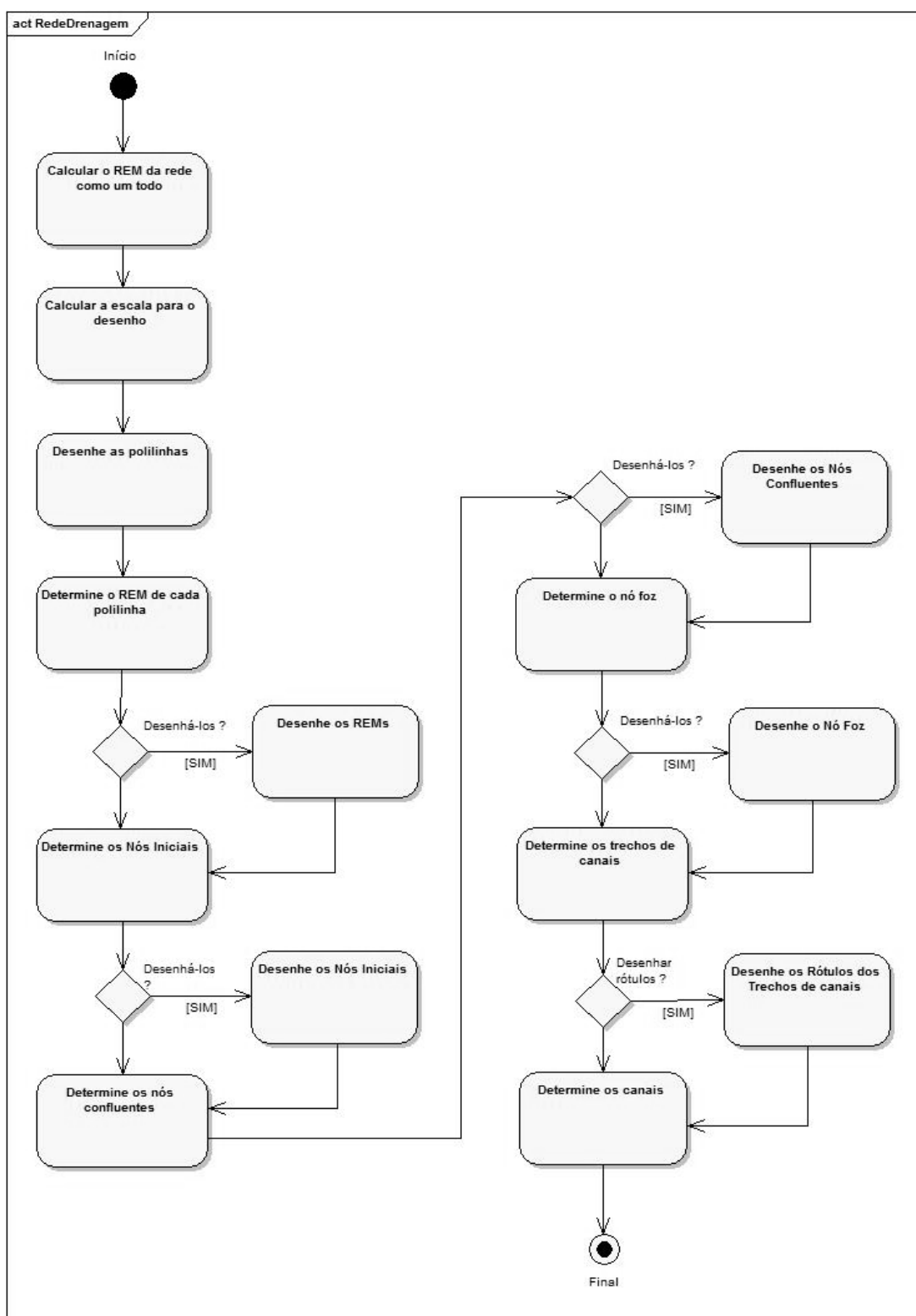


FIGURA 26 - EXEMPLO DE DIAGRAMA DE ATIVIDADES

FONTE: O autor (2008)

NOTA: Captura de tela do Enterprise Architecture

2.6.9 Modelo de classes do domínio

Num sistema orientado a objetos, a funcionalidade externa é fornecida por meio da colaboração entre objetos. Os participantes na operação do sistema (atores) interagem com o sistema e visualizam resultados de cálculos, mensagens recebidas, relatórios produzidos, entre outras atividades. Internamente os objetos do sistema colaboram entre si para produzir os resultados visíveis. Esta colaboração pode ser vista sob o aspecto estrutural estático e sob o aspecto dinâmico, onde a construção de um serve para adicionar detalhes no outro. No primeiro caso, diz-se estrutural pois a estrutura das classes de objetos e as relações entre elas são representadas e diz-se estático, pois não leva em conta a interação dos objetos no tempo. No segundo caso, diz-se dinâmico pois são representadas as interações entre os objetos ao longo do tempo, por meio da troca de mensagens entre eles, assim como as mudanças de estado destes objetos (BEZERRA, 2003, p. 95-96).

O modelo de classes de um sistema evolui durante as iterações do desenvolvimento do sistemas. À medida que o desenvolvimento acontece, novos detalhes podem ser incorporados ao modelo de classes. Bezerra (2003, p. 96) cita três níveis sucessivos de abstração pelos quais o modelo passa:

a) o modelo de classes de domínio representa as classes no domínio do negócio em questão e é construído na fase de análise e não leva em conta restrições tecnológicas a serem utilizadas na solução de um problema.

b) o modelo de classes de especificação é uma extensão do nível de domínio acrescentando-se detalhes específicos conforme a solução do software escolhida e é construído ou aperfeiçoado nas iterações da atividade de projeto do desenvolvimento.

c) o modelo de classes de implementação é uma extensão do modelo de especificação e corresponde à implementação das classes em alguma linguagem de programação. Este modelo é construído ou aperfeiçoado nas iterações da atividade de implementação do desenvolvimento.

2.6.10 Visibilidade e acessibilidade

Classes e membros de uma classe podem ter modificadores de acesso que indicam sua visibilidade e acessibilidade por parte de outras classes e objetos, permitindo que se possa ocultar classes e membros que não necessitem ser públicos e de oferecer membros que poderão ser vistos e utilizados externamente ao objeto. Esta técnica aplicada a membros do tipo atributo é conhecida como encapsulamento de dados (DEITEL; DEITEL, 2003, p. 418). São exemplos destes modificadores: *public*, *protected* e *private*. O primeiro declara que o membro estará acessível em qualquer lugar em que a classe estiver acessível; o segundo estabelece que o membro estará acessível a todas as classes dentro do pacote mas também às subclasses derivadas da classe em questão, mesmo que definidas em outro pacote; o terceiro define acessibilidade restrita somente dentro da classe em questão.

2.6.11 Relacionamentos, navegabilidade e multiplicidade

Um relacionamento é uma conexão entre classes. Outra questão importante diz respeito a navegabilidade entre objetos, ou a definição de como um objeto pode obter acesso a outro objeto. O sentido desta navegabilidade é que determina a dependência de um objeto em relação a outro ou a prioridade na sequência de construção dos objetos. A navegabilidade pode ser: unidirecional, bidirecional ou não especificada. No relacionamento entre classes, objetos de uma classe podem se associar com uma certa quantidade de objetos de uma outra classe ou a objetos da própria classe (auto-relacionamento ou reflexiva). Esta quantidade é definida como multiplicidade e cada associação entre objetos possui duas multiplicidades, uma em cada extremo da linha de associação. A multiplicidade define o número de instâncias que uma classe pode ter (BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 2006, p. 129). A figura 27 exemplifica alguns tipos de multiplicidade.

Nome	Simbologia
Apenas um	1
Zero ou muitos	0..*
Um ou muitos	1..*
Zero ou um	0..1
Intervalo específico	li..ls

FIGURA 27 - TIPOS DE MULTIPLICIDADE
FONTE: BEZERRA (2003)

2.6.12 Associação, agregação e composição

Segundo Booch, Rumbaugh e Jacobson (2006, p. 146-150), uma associação é um relacionamento estrutural, informando que objetos de uma classe se relacionam com objetos de outra classe (fig. 28). Esta conexão entre classes pressupõe algumas informações adicionais à associação em si: um nome, o papel em cada extremidade da associação, direção de navegação e a agregação. A agregação simples (fig. 28a) possibilita associar e diferenciar o “todo” da “parte” não modificando o significado da navegação e sem vincular o tempo de vida do todo e suas partes.

Outra forma de agregação é a composição, que adiciona semântica importante, com propriedade bem-definida. A agregação por composição é aquela quando o tempo de vida do todo é igual ao tempo das partes, sendo assim considerada uma relação “forte” (fig. 28b). A destruição do todo se propaga para as partes. Em contrapartida, a agregação simples se apresenta quando os tempos de vida podem ser diferentes entre a classe “todo” e as classes “partes”, sendo assim considerada uma relação mais “fraca” que a agregação por composição.

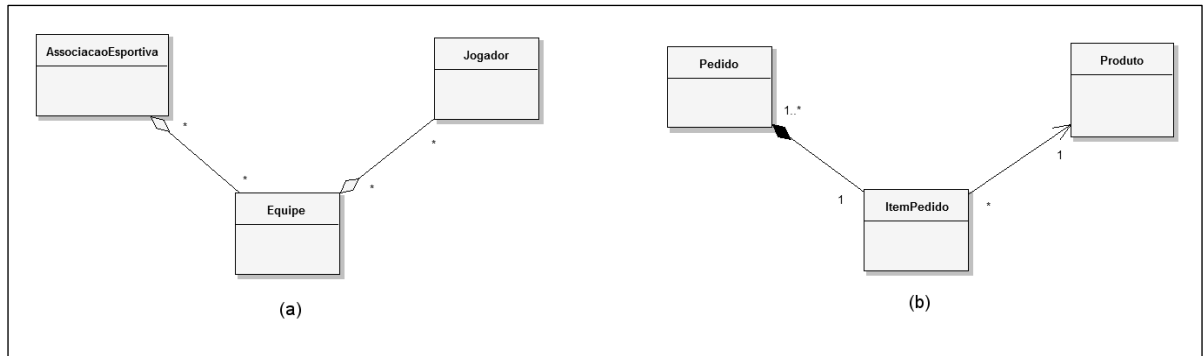


FIGURA 28 - TIPOS DE ASSOCIAÇÕES: (a) SIMPLES; (b) POR COMPOSIÇÃO
 FONTE: BEZERRA (2003, p. 104, 179)

2.6.13 Heranças, subclasses e superclasse

A classe estendida é dita superclasse e a extensão é conhecida como subclasse. A subclasse portanto é uma especialização da superclasse. A superclasse é portanto uma generalização da subclasse. A subclasse herda os membros da superclasse e pode sobrescrever métodos herdados ou declarar novos membros. Este mecanismo é chamado de herança (FLANAGAN, 2006, p. 122-125, 149). Diz-se que ocorre uma generalização (fig. 29) quando uma classe pode ser utilizada como “modelo” para outras classes mais especializadas ou derivadas.

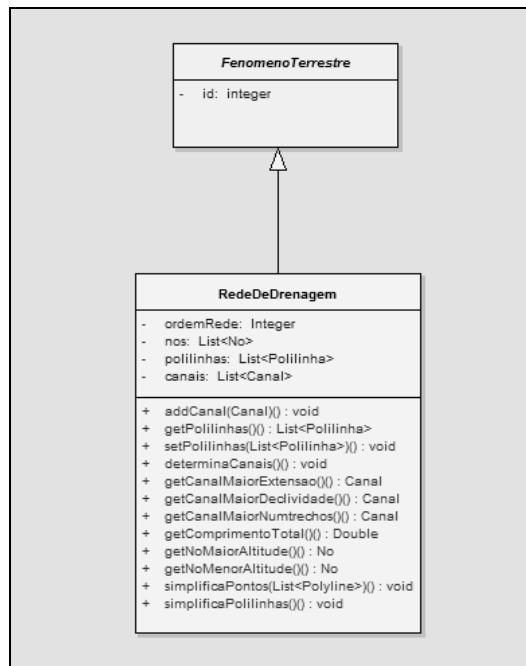


FIGURA 29 - EXEMPLO DE GENERALIZAÇÃO
 FONTE: O autor (2008)

Assim, as classes “filhas” desta generalização herdam membros (atributos e métodos) da classe “mãe”.

2.7 CARACTERÍSTICAS DA LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO JAVA

Segundo Flanagan (2006, p. 28-30), Java é uma linguagem de programação de propósito geral e fortemente associada a visão de orientação a objetos. Ela é voltada para múltiplas plataformas de equipamentos possibilitando portabilidade e para diferentes tipos de aplicações, como aplicação *web* para utilização com navegadores Internet (*browsers*), aplicações desktop para utilização isolada em computadores pessoais e aplicações em equipamentos portáteis como celulares e PDAs (*Personal Digital Assistants*). Para cada plataforma, uma arquitetura de CPU chamada JVM (*Java Virtual Machine*) deve estar previamente instalada para possibilitar a compilação do programa Java numa sequência de código intermediário chamado *bytecodes*. Este código é então interpretado e executado. Esta execução é apoiada por um conjunto predefinido e extenso de classes que formam o que é conhecido como plataforma Java ou “core Java APIs” (*Application Programming Interfaces*). Para escrever programas em Java é preciso obter o JDK (*Java Development Kit*) que contém as ferramentas básicas para o desenvolvimento. Este produto não deve ser confundido com o JRE (*Java Runtime Environment*) que é o ambiente disponibilizado para a simples execução dos programas Java. A literatura nesta área é extensa e para a implementação do protótipo desta pesquisa foram revisados partes dos textos dos trabalhos de Deitel e Deitel (2003), Flanagan (2006) e Horstmann (2005). Entre as principais características da plataforma e linguagem Java, algumas foram revistas para o emprego no desenvolvimento do protótipo desta pesquisa.

Para a realização da leitura de arquivos sequenciais são utilizados os métodos *FileInputStream*, *BufferedReader* e *readLine*. Para a gravação de arquivos sequenciais é possível utilizar os métodos *FileOutputStream*, *PrintWriter* e *println*. Exemplo de uso destes comandos pode ser visto no apêndice 1.

O método de recursão ou recursivo é uma técnica poderosa para transformar problemas computacionais complexos em problemas mais simples (HORSTMANN, 2005, p. 619). O método recursivo é um método que chama a si

próprio diretamente ou indiretamente, por meio de outro método, de forma que cada chamada recursiva simplifica de alguma forma o problema original, até que, por convergência, o método identifica o caso mais básico, resolve-o e retorna a solução para ser utilizada na solução da chamada anterior e assim por diante (DEITEL; DEITEL, 2003, p. 286). Tanto o método de recursão como o de iteração se baseiam em uma estrutura de controle, envolvem repetição e um teste de terminação. No entanto, uma solução recursiva é mais fácil de entender e implementar corretamente do que uma solução iterativa, embora a primeira possa ter uma performance levemente mais lenta (HORSTMANN, 2005, p. 643). Um exemplo de estrutura de recursão pode ser encontrado no apêndice 1.

Outra característica muito útil para armazenamento de uma coleção de itens em memória e explorada neste trabalho é a classe *List*. Uma *List* é uma coleção ordenada de objetos. Cada elemento de uma lista tem uma posição nessa lista. Ela define os métodos para ler e gravar itens de coleção, respectivamente *get()* e *set()* baseados em índice, assim como métodos para adicionar e remover um elemento com índice em particular, respectivamente *add(i, item)* e *remove(i)*, com *i* sendo o índice ordenado da coleção e *item* o objeto a ser adicionado à lista (FLANAGAN, 2006, p. 220). A figura 30 exemplifica a definição de três listas: lista de canais, de pontos e de trechos de canais. A linguagem Java permite a definição de listas “fortemente tipadas” como no exemplo citado. Este recurso é obtido acrescentando-se um sufixo chamado “marcador de lugar” após o tipo de variável; no primeiro exemplo da figura 30, “<Canal>” após o tipo “List”. Este recurso permite que se restrinja a possibilidade de acidentalmente se adicionar outro tipo de objeto, que não seja da classe definida, à lista em questão, no caso *Canal*. Este recurso é denominado de genérico (*generics*).

```
List<Canal> canais;  
List<Ponto> pontos = new ArrayList<Ponto>();  
List<TrechoDeCanal> trechos = new ArrayList<TrechoDeCanal>();
```

FIGURA 30 - EXEMPLOS DE DEFINIÇÕES DE LISTAS
FONTE: O autor (2008)

Para a construção de rotinas de visualização gráfica de formas bidimensionais, a linguagem Java dispõe de uma biblioteca extensa de métodos. O

sistema de coordenadas padrão desta biblioteca tem sua origem no canto superior esquerdo da região definida para o desenho, com a coordenada x sendo a distância horizontal para a direita e a coordenada y a distância vertical para baixo. As unidades de coordenadas são medidas em *pixels*. O pixel é a menor unidade de resolução do monitor de vídeo (DEITEL; DEITEL, 2003, p. 564-566). A figura 31 ilustra uma utilização desta biblioteca.

```
public void paint(Graphics g) {  
  
    super.paint(g);  
    g2 = (Graphics2D) g;  
  
    GeneralPath drawingPath = new GeneralPath();  
  
    drawingPath.moveTo(100, 100);  
  
    drawingPath.lineTo(110,105);  
    drawingPath.lineTo(150,120);  
    drawingPath.lineTo(130,80);  
  
    g2.setColor(Color.BLUE);  
    g2.setStroke(new BasicStroke(2.0f));  
  
    g2.draw(drawingPath);  
  
}
```

FIGURA 31 - EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS GRÁFICOS DA BIBLIOTECA AWT
FONTE: O autor (2008)

De acordo com a figura 31, uma sequência de linhas definidas por pontos pode ser desenhada por meio de métodos como *moveTo(x_i , y_i)* para posicionamento e *lineTo(x_j , y_j)* para desenho da linhas entre as últimas coordenadas e as atuais (x_j , y_j). Estes métodos normalmente utilizam um objeto da classe *GeneralPath*, o qual é passado como parâmetro para o método *draw()*. Este método, por sua vez, faz parte da API Java 2D e necessita um suporte de contexto gráfico da classe *Graphics2D* que é uma subclasse da classe *Graphics*. Toda a rotina de desenho gráfico normalmente é chamada por meio da ocorrência de um evento, como por exemplo, quando da ocorrência da exibição, translação ou alteração de tamanho do componente. Por ocasião do evento, uma chamada é realizada ao método *paint()* que deve ser sobrescrito com a rotina de tratamento codificada pelo programador.

A biblioteca Swing, integrante da plataforma Java, oferece componentes para utilização na construção de interfaces gráficas em programas Java, como caixas de diálogo, seleção de arquivos, botões, barras de ferramentas, entre outros. A tabela 3 apresenta uma descrição breve de alguns componentes desta biblioteca.

TABELA 3 - COMPONENTES PRINCIPAIS DA BIBLIOTECA SWING

Componente	Descrição
JDialog	Classe para construir janela de diálogo
JFileChooser	Classe para diálogo de escolha de arquivos
JFrame	Classe para criar uma janela com barra de título e botões para minimizar, maximizar e fechar a janela
JOptionPane	Classe para criar caixas de diálogos predefinidas que permitem exibição de mensagens em geral
UIManager	Classe para manter as informações sobre aparência e comportamento
JToolBar	Classe para definir região que receberá botões
JLabel	Área em que podem ser exibidos texto não-editável ou ícones
JButton	Classe para criar botão que aciona um evento quando o objeto recebe um clique do <i>mouse</i>

FONTE: DEITEL e DEITEL (2003)

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizados arquivos de dados, em formato texto, alguns com disposição dos registros própria ao software de onde foram produzidos e outros arquivos complementares definidos pelo autor do trabalho. Estes arquivos de dados definem uma rede de drenagem por meio de um grupo de registros de pontos, formando estruturas básicas de polilinhas e sem conferir caráter topológico à rede de drenagem. A quantidade e disposição destas polilinhas variam segundo alguns fatores como o processo de captura utilizado, a experiência do operador no processo de digitalização ou o algoritmo empregado no processo de extração e vetorização. Como as redes de drenagem utilizadas nos experimentos são de pequeno porte, com o número de nós abaixo de 100, é possível que uma variação da quantidade e disposição das polilinhas não fôsse influenciar significativamente a performance do algoritmo de determinação das confluências pelo método de interseção de REMs.

Três redes de drenagem foram consideradas a partir destes arquivos, sendo uma delas adotada para o preparo manual da simulação temporal em três épocas. Alguns ambientes de software foram utilizados como ferramentas e, por serem de uso comum, não foram detalhados neste trabalho. Uma metodologia foi proposta para a construção do modelo de classes de objetos, por meio da UML, e para o desenvolvimento do protótipo de software.

3.1 MATERIAL UTILIZADO

Os arquivos de dados de redes de drenagem cumpriram os seguintes propósitos: (1) ganhar conhecimento de qual é a estrutura interna de armazenamento da rede de drenagem, obtida pelos processos de digitalização e de extração; (2) servir de entrada de dados para o protótipo desenvolvido; (3) ter portabilidade entre o protótipo e o software ArcGIS®, para auxiliar em testes e na verificação de valores calculados.

Das três redes de drenagem utilizadas, duas foram obtidas por meio de digitalização de cartas topográficas e uma pelo processo de extração descrito no

apêndice 2. Para uma das redes, o arquivo de dados foi trabalhado manualmente para simular dois outros levantamentos temporais distintos, obtendo-se três épocas distintas.

Quatro ambientes de software foram empregados como ferramentas para visualização, conversão, modelagem e prototipação. A metodologia desenvolvida contemplou o processo de modelagem das classes de objetos em UML, que resultou no modelo de classes de objetos para redes de drenagem, e o processo de desenvolvimento do protótipo de software, no qual foi implementado o modelo.

3.1.1 Arquivos de dados

Inicialmente, procurou-se obter dados de redes de drenagem a partir de cartas do IBGE. No entanto, algumas dificuldades surgiram ao analisar tais produtos: (a) descontinuidade nas linhas representativas das redes de drenagem; (b) densidades de linhas variáveis para a mesma rede hidrográfica, entre cartas articuladas, provavelmente pelo emprego de diferentes metodologias em diferentes épocas e por diferentes equipes de profissionais; (c) dados de altimetria separados dos dados planimétricos.

Para a leitura de dados de redes de drenagem, dois tipos de arquivos são utilizados: um que armazena os valores de área e perímetro da rede, obtidos pela leitura no ArcGIS® e em disposição definida pelo autor do trabalho, e outro contendo as polilinhas da rede de drenagem, num padrão que guarda uma relação direta com o padrão aberto *shapefile*, cuja documentação pode ser encontrada em ESRI (1998). Foi definida uma nomenclatura própria para os nomes de arquivos dos experimentos. O primeiro tipo foi padronizado com o nome geral “rNNdados.txt” e ao segundo tipo foi atribuído o nome geral “rNNTK.txt”, onde NN é o número de identificação da rede de drenagem e K é o índice sequencial de tempo a que se refere a rede de drenagem.

O primeiro tipo de arquivo contém três registros: o primeiro expressa a área da bacia de drenagem, definido como “area=NNNNN”; o segundo fornece o valor do perímetro da bacia de drenagem, definido como “perimetro=NNNNN”, e o último define o comprimento do eixo maior da bacia de drenagem, definido como “lmax=NNNNN”. O valor “NNNNN” é um valor de ponto flutuante, com as unidades

km², km e km respectivamente. A ordem de entrada destes registros no arquivo é irrelevante. Nos experimentos, os valores obtidos para o arquivo foram obtidos de leitura manual no ArcGIS®, para cada rede de drenagem.

Para o segundo tipo de arquivo, os dados originais dos experimentos foram importados do formato DXF do ambiente AutoCAD e do formato *shapefile*, ambos tratados no ambiente ArcGIS® e convertidos para arquivos de texto. Este tipo de arquivo convertido foi analisado com o objetivo de entender a estrutura básica de armazenamento dos dados e de estabelecer um processo de leitura compatível para a construção das classes de objetos da rede de drenagem. O método de armazenamento dos dados se faz por cadeias de segmentos de linhas com direção e comprimento variáveis. Um exemplo deste tipo de arquivo pode ser visto na figura 32.

```

Polyline
0 0
0 66918,80 7223014,43 630,0 1, #QNAN
1 766932,27 7222983,82 610,0 1, #QNAN
2 766932,76 7222953,03 590,0 1, #QNAN
3 766934,63 7222922,43 588,2 1, #QNAN
4 766938,77 7222879,03 558,2 1, #QNAN
5 766938,1 7222848,48 532,6 1, #QNAN
6 766939,86 7222812,78 520,1 1, #QNAN
:::
102 767522,57 7220056,05 14,0 1, #QNAN
103 767542,17 7220022,48 12,0 1, #QNAN
104 767566,026765 7219997,4808 10,0 1, #QNAN
1 0
0 766619,92 7223062,16 700,0 1, #QNAN
1 766606,49 7223029,36 700,0 1, #QNAN
2 766595,66 7222999,04 700,0 1, #QNAN
3 766615,2 7222962,93 650,2742122961636 1, #QNAN
4 766645,19 7222939,31 600,0 1, #QNAN
5 766672,75 7222920,84 600,0 1, #QNAN
6 766707,93 7222902,2 600,0 1, #QNAN
7 766735,16 7222868,46 549,0733219627916 1, #QNAN
8 766757,24 7222832,29 531,5437117456294 1, #QNAN
9 766774,14 7222791,14 514,5194118456327 1, #QNAN
10 766786,0 7222752,66 500,0 1, #QNAN
11 766803,06 7222719,15 500,0 1, #QNAN
2 0
0 766258,27 7222800,53 700,0 1, #QNAN
1 766265,11 7222764,71 686,9434517711486 1, #QNAN
2 766290,02 7222741,21 666,3693065065703 1, #QNAN
3 766302,0 7222707,82 650,7122951901085 1, #QNAN
4 766316,63 7222679,47 634,9417719547188 1, #QNAN
5 766328,72 7222651,17 620,5958390995461 1, #QNAN
6 766348,27 7222615,06 600,0 1, #QNAN
7 766370,69 7222594,16 580,6317506865895 1, #QNAN
END
  
```

FIGURA 32 - EXEMPLO DE PARTE DE ARQUIVO DE DADOS DE REDE DE DRENAGEM
FONTE: O autor (2008)

O arquivo de dados apresenta basicamente quatro tipos de registros diferentes, descritos a seguir. O primeiro tipo de registro é utilizado para declarar o tipo de dados a que se refere o arquivo de dados. No caso, o primeiro registro declara que seguem-se dados de uma ou mais polilinhas, por meio da expressão "Polyline". O segundo tipo de registro contém duas colunas numéricas separadas por um espaço em branco, declarando a identificação da polilinha e do trecho parcial da polilinha, quando esta for segmentada com trechos de ressurgência. Esta segunda coluna não é tratada neste trabalho, tendo em vista a premissa de que canais com ressurgências não são considerados. O terceiro tipo de registro informa

um ponto da polilinha contendo a identificação sequencial do ponto na polilinha, iniciando-se em zero, e as coordenadas x, y e z em formato de ponto flutuante, separadas por um espaço em branco. As unidades das coordenadas estão em metros. Adicionalmente, uma quinta coluna pode descrever um valor numérico associado ao ponto e na semântica definida pelo pesquisador. Quando não empregada, a expressão “#QNAN” é utilizada por padrão. Finalmente, o quarto tipo de registro informa o término do arquivo, mediante o emprego da expressão “END”.

3.1.2 Redes de drenagem

A primeira rede, digitalizada a partir de carta topográfica, foi a referência para o desenvolvimento do modelo e do protótipo. Ela também serviu para os experimentos temporais, uma vez que dela se originaram outros dois conjuntos de dados simulados, perfazendo-se assim três levantamentos de tempos distintos. Esta rede está localizada no estado do Paraná, no município de Guaraqueçaba, entre as coordenadas (25° 05' S, 48° 22' W) e (25° 06' S, 48° 20' W) (fig. 33).

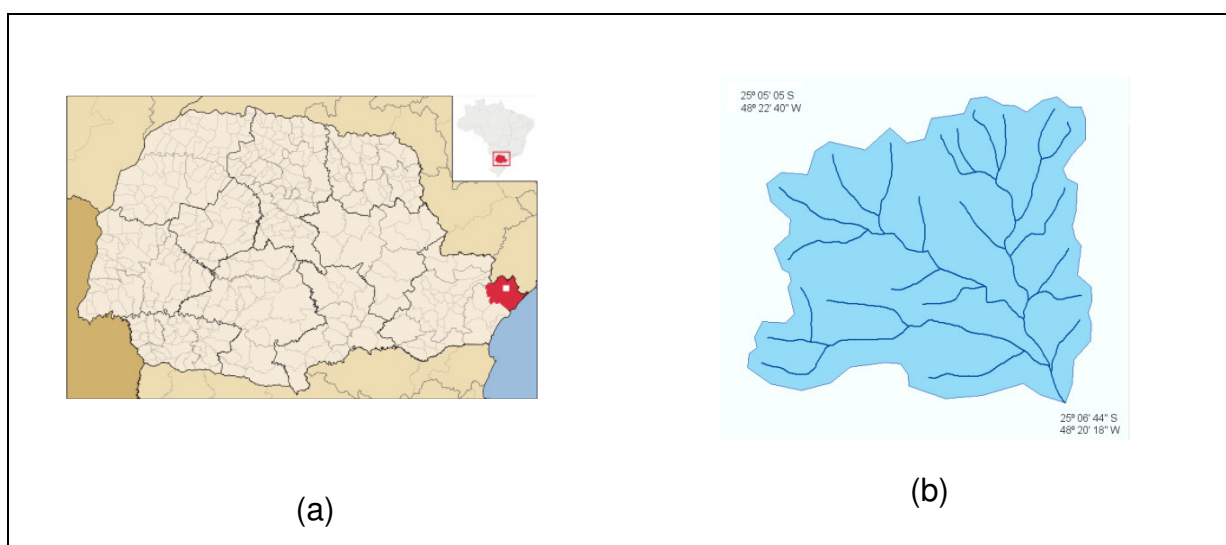


FIGURA 33 - LOCALIZAÇÃO (a) E BACIA HIDROGRÁFICA (b) DA REDE DE DRENAGEM Nº 1
 FONTE: Wikipédia (2008) (a); o autor (2008) (b)

A segunda rede de drenagem utilizada também foi obtida por digitalização de carta topográfica. Esta rede está localizada no estado do Rio de Janeiro, no município de Rio das Flores, entre as coordenadas ($22^{\circ} 10' S$, $43^{\circ} 27' W$) e ($22^{\circ} 11' S$, $43^{\circ} 26' W$) (fig. 34).

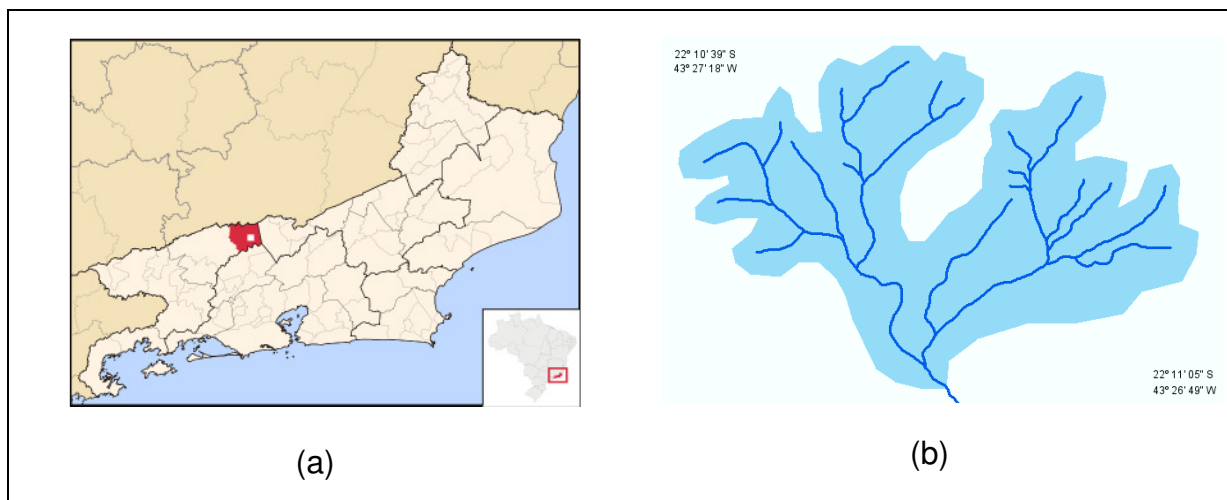


FIGURA 34 - LOCALIZAÇÃO (a) E BACIA HIDROGRÁFICA (b) DA REDE DE DRENAGEM Nº 2
 FONTE: Wikipédia (2008) (a); o autor (2008) (b)

A terceira rede de drenagem foi obtida pelo processo de extração descrito no apêndice 2, a partir de uma rede de 2.501 pontos altimétricos, proveniente de um exemplo que acompanha o software ArcGIS®. Esta rede se localiza no sul do condado de Hart, no estado do Kentucky, Estados Unidos, entre as coordenadas ($37^{\circ} 11' N$, $85^{\circ} 55' W$) e ($37^{\circ} 10' N$, $85^{\circ} 54' W$) (fig. 35).

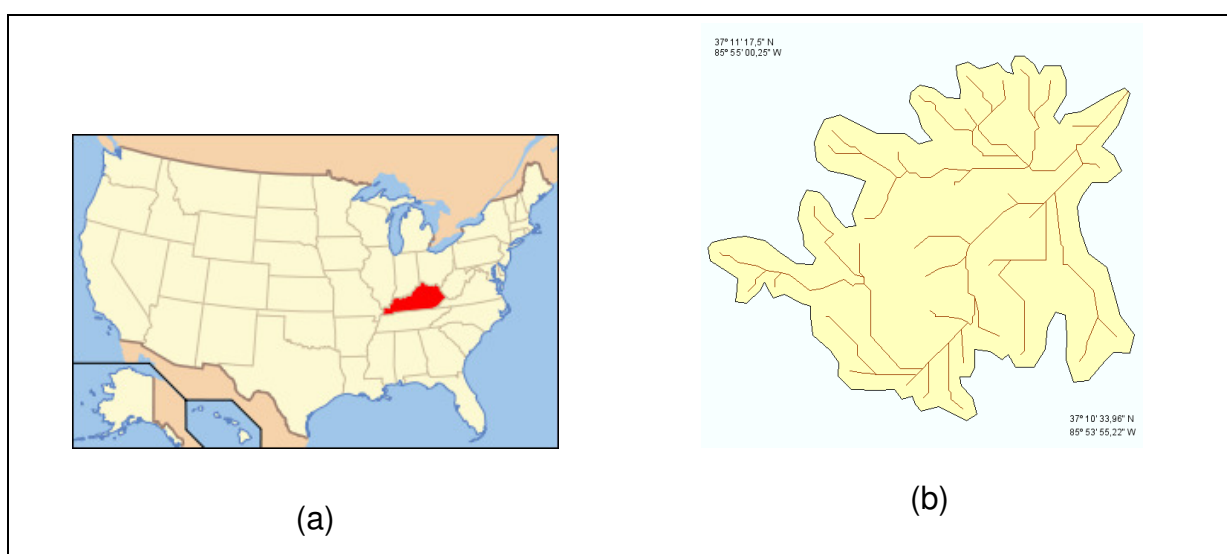


FIGURA 35 - LOCALIZAÇÃO (a) E BACIA HIDROGRÁFICA (b) DA REDE DE DRENAGEM Nº 3
 FONTE: Wikipédia (2008) (a); o autor (2008) (b)

3.1.3 Ambientes de software

Este trabalho utilizou os seguintes ambientes: software para leitura, visualização gráfica e conversão de dados ESRI ArcGIS® 9.2, software para construção de diagramas em UML Sparx Enterprise Architecture® 6.5, o ambiente de desenvolvimento de software SUN NetBeans® 6.1 e o software Google Earth® para visualização da rede de drenagem integrada com o relevo.

O software ESRI ArcGIS® 9.2 é constituído por um família de softwares, entre os quais o ArcMap®, utilizado neste trabalho para os seguintes propósitos: (1) ferramenta para visualização, edição de polilinhas e conversões de dados; (2) extração de redes de drenagem a partir de uma grade de pontos altimétricos, utilizando as extensões do ArcToolbox “Spatial Analyst” e “3D Analyst Tools”; (3) leitura e comprovação dos resultados obtidos.

O software Sparx Enterprise Architecture® 6.5 oferece um ambiente gráfico para o desenvolvimento de diagramas na notação UML, como os diagramas de casos de uso, diagramas de classes de objetos e diagramas de atividades. Este ambiente permite exportar as definições de classes e seus relacionamentos, atributos e operadores codificadas para a linguagem Java.

O ambiente SUN NetBeans® 6.1 foi utilizado para o desenvolvimento do protótipo, codificado em linguagem Java. Neste protótipo foi implementado o modelo de classes de objetos com os operadores necessários para a análise dos dados e síntese da rede de drenagem. A visualização gráfica da rede de drenagem foi produzida utilizando-se a biblioteca gráfica AWT. Os demais componentes da interface gráfica foram desenvolvidos com auxílio da biblioteca Swing. Ambas as bibliotecas são integrantes da plataforma Java.

Para ilustrar a integração das redes de drenagem dos experimentos ao relevo das regiões consideradas, o software Google Earth® foi empregado. Para tal, os dados da rede de drenagem foram exportados, mediante conversão pelo software ArcMap®, para o formato nativo deste ambiente, *Keyhole Markup Language* ou KML. A conversão do arquivo no ArcMap® é obtida por meio da função *Data Interoperability Tools* da ferramenta ArcToolbox (arquivo destino em formato KML).

O trabalho desta pesquisa se desenvolveu a partir da utilização dos ambientes citados neste item. A interconexão destes ambientes e o contexto de

utilização nas atividades desenvolvidas são abordados no item de metodologia.

3.2 METODOLOGIA

A metodologia da pesquisa foi conduzida segundo um fluxo de trabalho que consistiu na determinação do escopo do modelo, estudo e preparação de dados, modelagem do diagrama de classes de objetos, desenvolvimento do protótipo e execução e análise dos experimentos. Uma adaptação da terminologia estudada foi necessária para dar independência e maior proximidade com o tema.

3.2.1 Adaptação da terminologia

Foi visto que rede de drenagem de uma região geográfica define os caminhos de escoamento de líquidos na superfície topográfica, de acordo com o relevo da região (ROSIM; PELLEGRINO, 1999, p. 1), (PINTO *et al.*, 1976, p. 36). Como as redes de drenagem podem existir, mesmo que não haja temporariamente o líquido para o escoamento superficial, os termos: nascente, foz, confluência, trecho de curso d'água, curso d'água e rio (TEIXEIRA *et al.*, 2007) foram adaptados. As seguintes denominações são sugeridas e adotadas neste trabalho:

- nó nascente: nó que representa o surgimento do canal de drenagem;
- nó foz: nó final do canal de drenagem;
- nó de confluência: nó resultante da convergência de dois ou mais trechos de canais;
- trecho de canal: sequência de segmentos interligados que conectam um nó foz ao seu nó de confluência vizinho, ou que ligam sucessivos nós de confluência, ou que ligam um nó de confluência e o nó nascente vizinho;
- canal de drenagem: sequência de trechos interligados que conectam um nó nascente a um nó foz;
- rede de drenagem: conjunto de canais de drenagem que têm o mesmo nó foz.

3.2.2 Fluxo geral do trabalho

O fluxo de trabalho se desenvolveu conforme ilustra a figura 36. O diagrama da figura apresenta quatro blocos maiores que agrupam atividades afins: modelagem de redes de drenagem, preparação de dados, desenvolvimento do protótipo e execução dos experimentos.

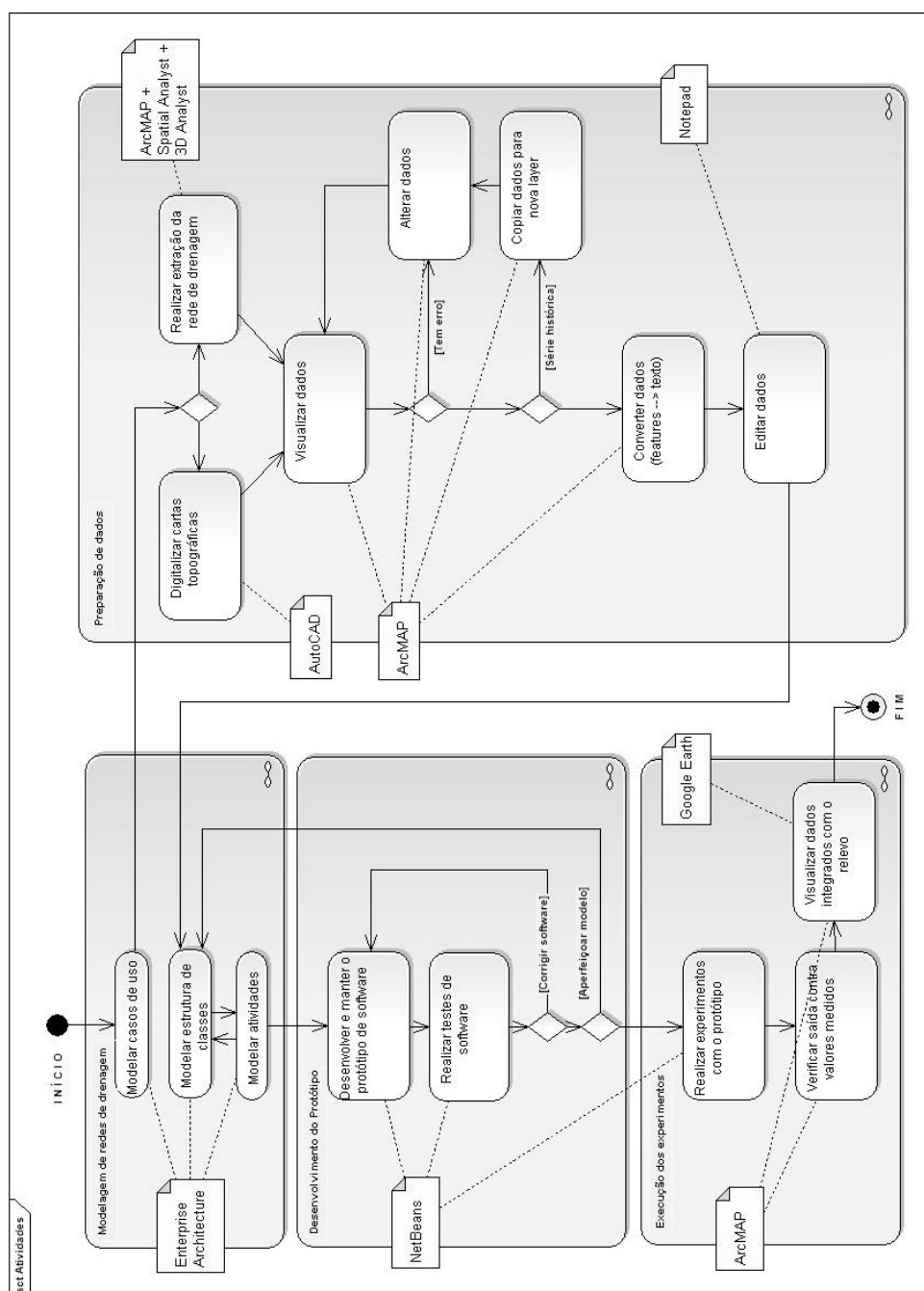


FIGURA 36 - DIAGRAMA DE ATIVIDADES DO TRABALHO REALIZADO
FONTE: O autor (2008)

3.2.3 Determinação do escopo do modelo

Em função do objetivo geral deste trabalho, determinou-se o escopo da modelagem de rede de drenagem a ser desenvolvida, definindo-se na terminologia UML os atores e casos de uso deste escopo (fig. 37). Três atores foram identificados: Usuário, AutoCAD e ArcGIS. O ator Usuário, por sua vez, pode ser especializado no ator Pesquisador e no ator Gestor. Ambos utilizam o sistema como ferramenta básica para empregar redes de drenagem, sob o ponto de vista geométrico e topológico. Os atores AutoCAD e ArcGIS possibilitam o preparo e conversão de dados por meio de procedimentos manuais indicados pelo ator Usuário.

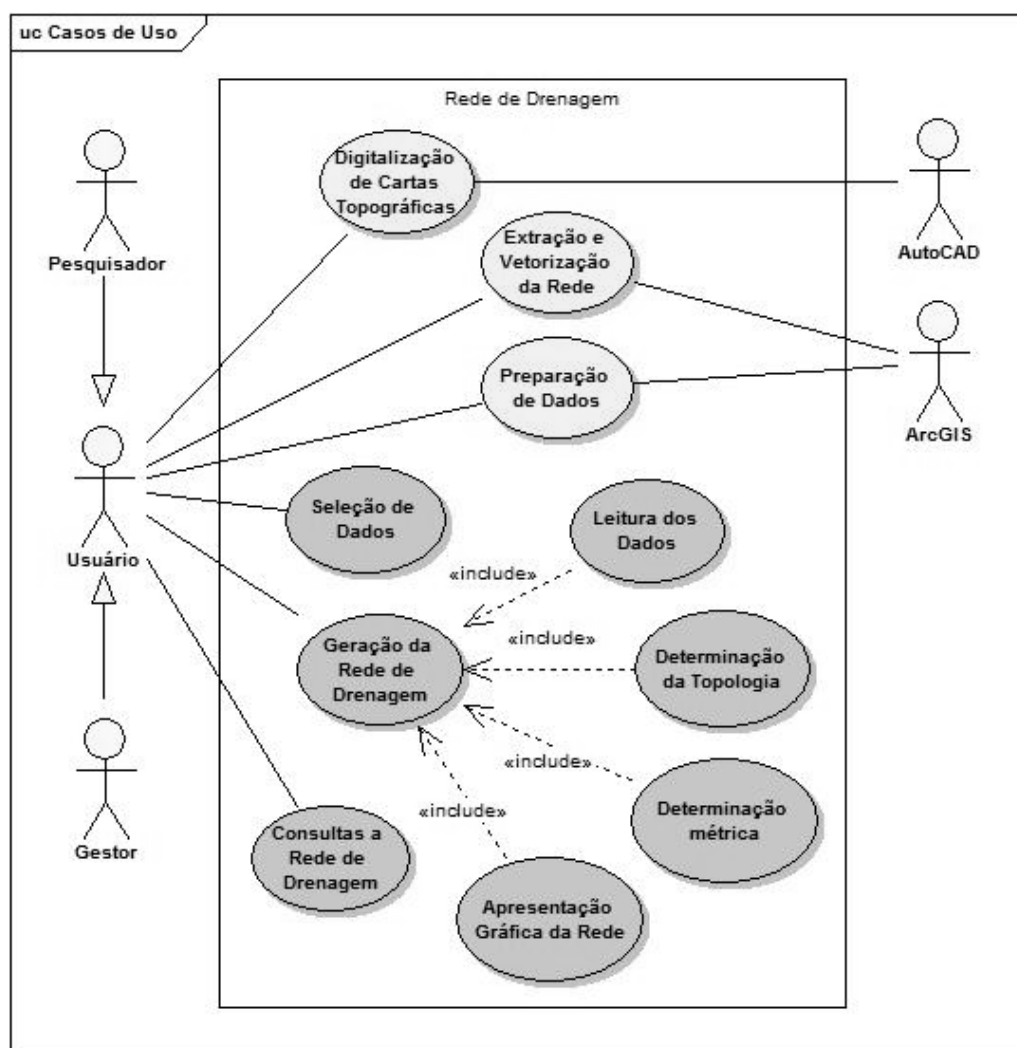


FIGURA 37 - DIAGRAMA DE CASO DE USO GERAL "REDE DE DRENAGEM"
FONTE: O autor (2008)

O diagrama da figura 37 contém dez casos de uso. Os três primeiros tratam de operações manuais para obter arquivos de dados prontos para a geração de redes de drenagem: “Digitalização de Cartas Topográficas”, “Extração e Vetorização da Rede” e “Preparação de Dados”. No primeiro, o ator Usuário interage com o ator AutoCAD para produzir arquivos de digitalização de cartas, que posteriormente serão lidos pelo ator ArcGIS para continuação no preparo de dados. O segundo caso de uso tem por escopo a extração e vetorização de uma rede de drenagem, a partir de um arquivo de pontos altimétricos. Este caso de uso está descrito no apêndice 2. O terceiro caso de uso tem por escopo a preparação dos dados, quando o ator Usuário interage com o ator ArcGIS para definir uma sub-região geográfica, filtrar elementos indesejáveis entre as feições, corrigir erros e posteriormente realizar a conversão de dados para arquivos de textos, esta parte descrita no apêndice 3. Estes casos de uso são chamados aqui de complementares e foram representados no diagrama em tom verde claro.

Os casos de uso principais e que foram desenvolvidos no protótipo de software neste trabalho encontram-se destacados em tom cinza-escuro. Eles são: “Seleção de Dados”, “Geração de Rede de Drenagem” e “Consultas a Rede de Drenagem”. O caso de uso “Seleção de dados” tem por escopo o tratamento de escolha de arquivos para trabalho com uma rede de drenagem. O segundo caso de uso principal tem por escopo a geração, propriamente dita, de objetos da rede de drenagem. Este caso de uso foi dividido nos seguintes subcasos de uso: “Leitura de Dados”, “Determinação da Topologia”, “Determinação métrica” e “Apresentação Gráfica da Rede”, cada qual com seu escopo delimitado. O caso de uso “Consulta de Valores da Rede” realiza a exploração dos objetos da rede instanciados pelo caso de uso principal anterior, fornecendo valores numéricos e demais resultados da topologia obtida. Esta separação dos casos de uso propiciou melhor definição das etapas necessárias para a construção dos objetos da rede de drenagem, respondendo à pergunta “o que será trabalhado?”.

3.2.4 Estudo e preparação dos dados

Na sequência da pesquisa estudou-se o processo de extração de redes de drenagem a partir de um exemplo de uma grade de 2.501 pontos altimétricos, até a

vetorização final, com produção de saída em arquivo do tipo *shapefile* por meio da utilização do software ArcGIS® (apêndice 2). Isto possibilitou melhorar o conhecimento do processo e o formato padrão do arquivo de dados de saída, auxiliando a análise e projeto do modelo de classes de objetos. Em seguida, por operações de seleção e recorte (*clipping*) procurou-se identificar e isolar parte dos dados num agrupamento de dados menor, com o intuito de eliminar polilinhas espúrias e de ganhar maior controle sobre os dados.

A documentação sobre arquivos *shapefile* foi consultada para verificar a estrutura interna do arquivo (ESRI, 1998). Alternativamente, foram também estudados alguns arquivos produzidos por digitalização manual sobre cartas topográficas. Na análise destes arquivos, algumas observações importantes puderam ser registradas: (a) descontinuidade entre polilinhas que deveriam estar encadeadas; (b) erros de junção nas extremidades das polilinhas; (c) polilinhas digitalizadas duas ou mais vezes para um mesmo trecho da rede; (d) ocorrência de polilinhas digitalizadas, ora no sentido a montante, ora a jusante da rede. Dois tipos de erros comuns encontrados em polilinhas digitalizadas estão exemplificados na figura 38. A fim de se evitar estes tipos de erros, softwares de CAD e de SIG, em geral, possuem um recurso chamado *snapping* que, quando ativado, permite conectar inequivocamente os segmentos em operações manuais, sem que haja cruzamento ou pontas extras nas conexões. Estes erros e ocorrências foram levantados quando da realização dos primeiros testes com o protótipo desenvolvido e foram tratados por meio de edição no software ArcMap®.



FIGURA 38 - ERROS COMUNS ENCONTRADOS EM POLILINHAS DIGITALIZADAS
FONTE: O autor (2008)

Em seguida, estudaram-se formas de ler arquivos *shapefile*, para deles iniciar a sequência de instanciação de objetos segundo o modelo de classes de

objetos proposto. Algumas possibilidades de leitura de arquivo do tipo *shapefile* foram estudadas: (a) diretamente a partir de rotinas já existentes e codificadas em linguagem JAVA (PEREIRA, 2001). No entanto, esta alternativa se mostrou dispendiosa pela necessidade de manutenção e adaptações necessárias para contemplar *shapefiles* modificados por sucessivas edições no ambiente ArcGIS® decorrentes de eliminação de erros de digitalização, supressão de ruídos de polilinhas disjuntas, entre outras ocorrências. Três outras alternativas foram estudadas: (b) fazer o carregamento dos arquivos *shapefile* para um banco de dados espacial SQL/PostGIS (PEREIRA NETO, 2003 e MITCHELL, 2005) para a partir dele, fazer a leitura pelo programa Java, mediante a utilização de comandos da linguagem SQL (*Structured Query Language*). A grande vantagem desta alternativa seria a abertura de outras possibilidades para a pesquisa, uma vez que a extensão espacial deste banco permite a utilização de diversos operadores espaciais; (c) utilizar um conjunto de funções da biblioteca “GeoTools” (ZEILHOFER *et al.*, 2007), (GEOTOOLS, 2007). Uma possível desvantagem se apresentou na complexidade introduzida para o aprendizado desta biblioteca; (d) converter o arquivo *shapefile* para arquivo em formato de texto a partir do software ArcGIS®. Esta última alternativa foi a mais promissora, pois não desviou o foco da pesquisa e possibilitou a busca por resultados de forma mais direta. A alternativa de conversão também se mostrou mais universal, pela razão de se utilizar um arquivo comum, em formato de texto, disposto num certo padrão, além de possibilitar o controle sobre os dados. Esta conversão é apresentada no apêndice 3.

3.2.5 Construção do modelo de classes de objetos

Para a construção do modelo de classes, a análise iniciou-se com o estudo das três principais classes propostas por Vieira (2004): *Recobrimento*, *AreaLevantamento* e *FenomenoTerrestre*. A classe *RedeDeDrenagem* foi desenvolvida, especializando-se a classe *CorpoHidrico*, derivada da classe *FenomenoTerrestre*. Enumerou-se uma seleção de possíveis substantivos referentes ao tema e uma análise de possíveis ligações semânticas entre eles, considerando-se que redes de drenagem podem ser representadas por grafos acíclicos em árvore. Desta seleção inicial, as primeiras classes começaram a ser

desenvolvidas, partindo-se de agrupamentos espaciais maiores para objetos espacialmente menores. Paralelamente a este processo de criação investigou-se a estrutura dos arquivos de dados produzidos nos processos de extração e captura de redes de drenagem. Nesta investigação, a análise partiu de forma inversa, ou seja, iniciando-se dos pontos ordenados das polilinhas para então examinar as polilinhas individualmente e, em seguida, coletivamente.

Algumas interseções de polilinhas foram estudadas visualmente no editor do ArcMap® e verificou-se a necessidade de criar novo ponto na polilinha que recebesse a contribuição das demais polilinhas em cada interseção. Neste processo, a polilinha receptora do novo ponto recebeu o nome de polilinha alvo. O ponto de interseção recebeu a denominação de nó de confluência.

Como resultado das duas atividades de análise complementares, algumas classes candidatas foram arroladas: *RedeDeDrenagem*, *Canal*, *TrechoDeCanal*, *No*, *Segmento* e *Ponto*. A ideia inicial indicava para a seguinte ordem: rede de drenagem é composta de canais, cada canal composto de trechos de canais, cada trecho de canal composto por dois nós extremos e um conjunto de segmentos de retas e cada segmento de reta formado por dois pontos topográficos. Constatou-se que, um trecho de canal não era formado necessariamente por uma única polilinha, podendo o trecho recair num dos seguintes casos: ser parte de uma polilinha, ser coincidente com uma polilinha completa ou ainda ser formado por um grupo de polilinhas. Outra dificuldade se relacionou com o fato de aparentemente não haver uma ordem ou lei de formação das polilinhas com a distribuição da rede de drenagem. Cada polilinha, por sua vez, já contemplava um conjunto ordenado de pontos, com sentido jusante ou montante, dependendo de como foi realizado o processo construtivo. Evidenciou-se também que a classe *Segmento* de certa forma não fornecia contribuição ao modelo, por já haver sustentação destes nas próprias polilinhas e não representar, topologicamente, relevância. A classe *Segmento* foi abandonada. Verificou-se que a classe inicialmente denominada de *Ponto* neste trabalho não refletia a mesma semântica adotada na classe *Ponto* do trabalho de Vieira (2004). Esta é mais geral, podendo representar pontos espaciais não presentes na superfície topográfica, enquanto aquela empregaria somente pontos topográficos, ou seja, pontos sobre a superfície terrestre. Para esta distinção entre dois estados o autor daquele trabalho adicionou um atributo *booleano* discriminador, de nome *tipoTopografico*. Para

aumentar a coesão, a classe *Ponto* deste trabalho foi então renomeada para *PontoTopografico* e definida como uma subclasse da classe *Ponto*. A programação que trata esta extensão é apresentada num dos itens do apêndice 1. Também ficou evidenciado que um ponto topográfico não é necessariamente um nó, mas todo nó está associado a um único ponto topográfico.

Comprovou-se pelo estudo a necessidade da criação dos nós de confluência a partir das interseções entre polilinhas, adicionando-se o ponto assim formado por este nó na lista de pontos da polilinha alvo. Como diferentes tipos de nós surgiram, uma nova classe do tipo enumeração foi adicionada ao modelo e um membro foi adicionado a classe *No* para permitir identificar o tipo de nó. Esta classe recebeu o nome *TipoDeNo*.

Observa-se que as classes originais *AreaLevantamento*, *FenomenoTerrestre* e *Recobrimento* possuem um atributo denominado *retanguloEnvolvente*. Este atributo abriga o retângulo necessário para envolver cada um dos objetos de cada classe e auxilia na determinação de possíveis interseções com outros objetos, otimizando o esforço computacional desta determinação. Neste trabalho, e de acordo com a revisão de literatura efetuada, este termo foi denominado de retângulo envolvente mínimo ou simplesmente “REM”, mantendo o significado original do termo. Assim, uma classe adicional de nome *REM* foi incluída no modelo de classes. De forma análoga, a classe *Polilinha* também foi relacionada com a classe *REM* e recebeu um novo operador de nome *REMsInterceptam(Polilinha polilinhaPara)*. Este operador tem a finalidade de indicar se o REM do objeto polilinha em questão intercepta o REM da polilinha indicada pelo parâmetro. Assim, esta classe *REM* passou a estar associada às quatro classes do modelo: *AreaLevantamento*, *FenomenoTerrestre*, *Recobrimento* e *Polilinha*.

Com a rede de drenagem espacialmente caracterizada, a questão temporal passou a ser a preocupação seguinte. Na classe *Recobrimento*, adicionou-se um operador para possibilitar comparações de grandezas de um mesmo fenômeno presente, em áreas de levantamento de instantes de tempos distintos. Como um recobrimento é formado por duas ou mais áreas de levantamento, de instantes diferentes para uma mesma região geográfica, a classe *Recobrimento* recebeu um operador para comparações temporais, denominado *variacaoDensidadeDrenagem()*

que operando sobre diferentes instâncias da classe *AreaLevantamento* devolve como resultado a variação da densidade de drenagem de diferentes épocas.

3.2.6 Desenvolvimento do protótipo de software

Para demonstrar o emprego efetivo do modelo de classes de objetos, imaginou-se o desenvolvimento de um protótipo de software que implementasse o modelo de classes e pudesse ler arquivos de dados, determinasse a topologia necessária, visualizasse graficamente a rede instanciada e apresentasse resultados numéricos de operadores que seriam confrontados com as leituras no ArcGIS®. Para tal desenvolvimento, os seguintes passos foram seguidos:

- 1) definir os requisitos mínimos do protótipo de software, tendo em vista o modelo de classes definido, o tipo de arquivo de dados de entrada, a visualização gráfica requerida e os operadores a serem utilizados;
- 2) desenvolver o protótipo de software por meio de refinamentos sucessivos, utilizando a linguagem Java e o ambiente de desenvolvimento definido;
- 3) testar o protótipo de software para cada etapa de desenvolvimento, adotando-se a rede de drenagem nº 1 como piloto;
- 4) modificar eventualmente tanto o software quanto o modelo de classes de objetos em função das correções detectadas no passo anterior;
- 5) testar o protótipo para as duas outras redes consideradas.

O desenvolvimento do protótipo de software, que implementa o modelo de classes de objetos, seguiu a metodologia de desenvolvimento por etapas de refinamentos sucessivos: a cada final de etapa, testes eram realizados e novas funcionalidades introduzidas sucessivamente. Para garantir independência e desacoplamento de classes de naturezas diferentes na implementação do protótipo, procurou-se separar em pacotes (*packages*) as classes diretamente envolvidas com o modelo de redes de drenagem das demais classes auxiliares, tais como: classes de leitura de arquivo de dados, de visualização da rede de drenagem e de construção e gerenciamento da interface de visualização. Isto possivelmente melhorou a robustez do modelo, frente a manutenção de um dos pacotes e numa

possível troca tecnológica futura. Neste processo iterativo de construção e na execução de testes, o modelo inicialmente concebido foi alterado algumas vezes em alguns detalhes, para melhoramentos sobre os membros das classes (atributos, operadores e assinaturas dos parâmetros). Durante a consecução de testes, o depurador de erros, oferecido pelo ambiente de desenvolvimento utilizado, se provou de grande auxílio.

A construção dos objetos das classes do modelo de redes de drenagem, a partir da execução do protótipo, segue um processo de construção “de baixo para cima” (*bottom-up*). A partir das polilinhas de pontos lidas do arquivo de dados de entrada, que não guardam relação topológica, determinam-se os nós nascentes e, pela interseção das polilinhas, os nós de confluência.

Os passos utilizados para a construção dos objetos das classes do modelo são os seguintes:

- 1) Com a seleção do arquivo de dados contendo as descrições das polilinhas da rede de drenagem, uma leitura é realizada. Esta leitura faz uma consistência prévia para verificar se o arquivo selecionado está no formato padrão esperado. Um objeto da classe *Recobrimento*, um objeto da classe *AreaLevantamento* e um objeto da classe *RedeDeDrenagem* são instanciados. Nesta leitura, as polilinhas são criadas já se estabelecendo os nós iniciais e finais de cada uma. Associado a este arquivo, um outro arquivo contendo valores da área e perímetro da rede é lido e os valores são atribuídos aos respectivos membros do objeto da classe *RedeDeDrenagem*;
- 2) A partir da pasta onde o arquivo de dados é encontrado, verifica-se se a rede de drenagem apresenta mais de uma área de levantamento temporal para o mesmo recobrimento, pela busca de sucessivos arquivos que representem a mesmo fenômeno terrestre em tempos distintos. Para cada novo arquivo existente, dois objetos são inicialmente instanciados: objeto da classe *AreaLevantamento* associados ao objeto da classe *Recobrimento* e objeto de classe *RedeDeDrenagem* em questão;
- 3) o processamento segue com um tratamento de simplificação dos objetos da classe *Polilinha* procurando unir polilinhas que possuem nós

iniciais coincidentes com nós finais de outras polilinhas e eliminando eventuais pontos de coordenadas redundantes;

- 4) como as polilinhas são construídas no sentido jusante, por premissa, os nós iniciais das polilinhas que não se conectaram são associados a um objeto da classe *TipoNo* instanciado como nó *NASCENTE*;
- 5) em seguida, o fluxo instancia os objetos da classe *REM* (Retângulo Envolvente Mínimo) obtendo-se os atributos *xmin*, *ymin*, *xmax* e *ymax* de cada objeto da classe *Polilinha*;
- 6) de posse dos objetos da classe *REM*, o próximo algoritmo determina as interseções geométricas entre objetos polilinhas obtendo os objetos nós que recebem um objeto da classe *TipoNo* instanciado como nó *CONFLUÊNCIA*;
- 7) com os objetos de nós de confluências determinados, o objeto nó foz é determinado e recebe um objeto da classe *TipoNo* instanciado como nó *FOZ*;
- 8) com todos os objetos nós determinados, inicia-se o processo recursivo de descoberta dos trechos de canais. Os objetos da classe *TrechoDeCanal* são obtidos. A partir do nó foz, são determinados sucessivamente os diversos trechos de canais e seus respectivos comprimentos, empregando-se a capacidade da linguagem Java de poder expressar o algoritmo de forma recursiva (apêndice 1). Cada objeto desta classe pode ser uma combinação entre um nó nascente e um nó de confluência vizinho, ou entre um nó nascente e um nó foz vizinho, ou entre dois nós de confluências vizinhos ou ainda entre um nó de confluência e um nó foz vizinho. Estes objetos possuem um direcionamento determinado, por apresentar um nó inicial e um nó final do trecho. Esta característica é importante, pois permite o caminhamento iniciando-se num nó nascente, sem se deparar com uma finalização em outro nó nascente. Nesta determinação, o comprimento de cada trecho é calculado, tornando-se atributo do respectivo trecho;
- 9) com os objetos da classe *TrechoDeCanal* determinados, inicia-se o processo de criação dos diversos objetos da classe *Canal* mediante a utilização do operador *determinaCanais()*. Cada objeto da classe *Canal*

colecciona os objetos de trechos de canais, percorrendo-se recursivamente todos os objetos a partir de cada objeto nó nascente. Neste caminhamento, o cálculo do comprimento do canal e sua declividade são calculados e tornam-se valores dos respectivos atributos destes objetos. Com o conjunto de objetos da classe *Canal* instanciados, operadores de rede como *getCanalMaiorExtensao()* e *getCanalMaiorDeclividade()* podem ser utilizados;

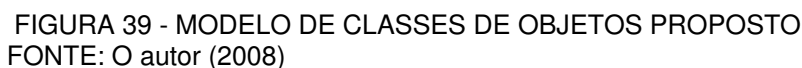
- 10) em seguida, o objeto da classe *RedeDeDrenagem* inicia o processo para determinação dos diversos canais. Neste caminhamento, o cálculo de comprimento dos canais é efetuado por meio do operador apropriado;
- 11) operadores do objeto da classe *RedeDeDrenagem* são chamados para determinar o canal de maior comprimento e o canal de maior declividade;
- 12) finalmente, se um histórico de levantamentos foi obtido, o operador *varDensidadeDrenagem()* é chamado para obter as variações de densidade entre os levantamentos temporais sucessivos;
- 13) a rede obtida é visualizada por meio de funções da biblioteca AWT.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O principal resultado obtido com este trabalho foi o modelo de classes de objetos que expressa formalmente redes de drenagem e seus aspectos geométricos e topológicos ao longo de uma série temporal (fig. 39). Por meio da UML, foi possível desenvolver o modelo proposto, partindo-se de uma especialização da subclasse *CorpoHidrico* da classe abstrata *FenomenoTerrestre* proposta por Vieira (2004). Adicionalmente, foi desenvolvido um protótipo de software, em linguagem Java, com o propósito de aplicar o modelo proposto, instanciando-se ordenadamente os diversos objetos a partir da leitura de arquivos de pontos de redes de drenagem. O protótipo foi estruturado numa arquitetura de classes de objetos, organizadas em três pacotes distintos: de classes de interface gráfica, de classes de leitura de arquivos e registros e de classes de rede de drenagem propriamente dito. Com o desenvolvimento de operadores de classes previstos no modelo, foi possível resolver topologicamente a construção da rede de drenagem, demonstrar a utilidade das classes e de seus relacionamentos, apresentar graficamente a rede de drenagem, e acompanhar a variabilidade espacial da rede de drenagem, ao longo do tempo. Experimentos foram realizados com três redes de drenagem e os resultados da instanciação dos objetos do modelo foram reunidos junto à visualização da respectiva rede de drenagem. Os valores numéricos de medidas destes resultados puderam ser comparados e confirmados com as leituras obtidas das redes de drenagem no editor do ArcGIS®.

4.1 DIAGRAMA DE CLASSES DE OBJETOS DE REDE DE DRENAGEM

O diagrama de classes proposto (fig. 39) apresenta o conjunto de classes que expressa conceitualmente redes de drenagem identificando as classes e seus relacionamentos.



As classes que foram utilizadas do trabalho de Vieira (2004) estão representadas neste diagrama em tom verde claro, e as específicas de redes de drenagem, desenvolvidas neste trabalho, em bege. Da classe *CorpoHidrico*, derivou-se a classe *RedeDeDrenagem* e todas as demais classes relacionadas do modelo de rede de drenagem. Este diagrama reúne os principais membros de cada classe de objetos, tendo como escopo as características geométricas, topológicas e temporais de redes de drenagem. Foram omitidas do diagrama as classes auxiliares e que não se enquadram no escopo direto do projeto.

Pelo diagrama, observa-se que a classe *Recobrimento* possui uma coleção de objetos da classe *AreaLevantamento* e esta por sua vez, se relaciona com uma coleção de objetos da classe *FenomenoTerrestre*. A classe *AreaLevantamento* define o membro *instanteObservacao*, que indexa no tempo e com a granularidade no formato “DD/MM/AAAA” toda a coleção de objetos da classe *FenomenoTerrestre* associados a um objeto da classe *AreaLevantamento*. Assim, a temporalidade no modelo é obtida para todos os objetos de classes e seus descendentes, que venham a especializar a classe *FenomenoTerrestre*. Resultados desta temporalidade são apresentados adiante neste capítulo.

A classe *RedeDeDrenagem* é uma especialização da classe *CorpoHidrico* e o modelo de redes de drenagem se desenvolve a partir da classe *RedeDeDrenagem*. Na sequência de leitura do diagrama de classes, um objeto da classe *RedeDeDrenagem* se relaciona com três coleções de objetos de classes diferentes por meio de uma associação do tipo agregação: uma coleção de objetos da classe *Canal*, uma coleção de objetos da classe *Polilinha* e uma coleção de objetos da classe *TrechoDeCanal*.

Cada objeto da classe *Canal*, por sua vez, possui uma coleção de objetos da classe *TrechoDeCanal* e uma associação com “n” objetos da classe *No*. Cada objeto da classe *TrechoDeCanal* tem dois relacionamentos com objetos da classe *No*, um para o nó inicial e outro para o nó final do trecho. Inversamente, cada objeto da classe *No* pode fazer parte de alguns objetos da classe *TrechoDeCanal*. Estes detalhes é que tornam a rede um grafo esparso orientado, com os trechos e nós implementados na forma de uma lista de adjacência e possibilita realizar o caminhamento ao longo dos trechos. Cada objeto da classe *No* possui um único objeto associado da classe *PontoTopografico*, mas cada objeto da classe

PontoTopografico não tem necessariamente um objeto da classe *No*. A classe *No* pode ser especializada em três outras classes denominadas *NoNascente*, *NoConfluente* e *NoFoz*.

Um objeto da classe *Polilinha* tem uma coleção ordenada de objetos da classe *PontoTopografico* e contém uma coleção de objetos da classe *No*. Cada objeto da classe *Polilinha* também possui um único objeto da classe *REM* (Retângulo Envolvente Mínimo). Um objeto da classe *RedeDeDrenagem* está preparado para tratar o ordenamento dos trechos de canais, por meio do operador *ordenaRede(TipoOrdenamento tipoOrdem)*. Em função do tipo de ordenamento, que define o método aplicável, o operador realiza a classificação dos diversos trechos de canais da rede de drenagem.

Em seguida, as principais classes do modelo obtido são apresentadas, seguindo-se uma discussão sobre suas estruturas de atributos e operadores:

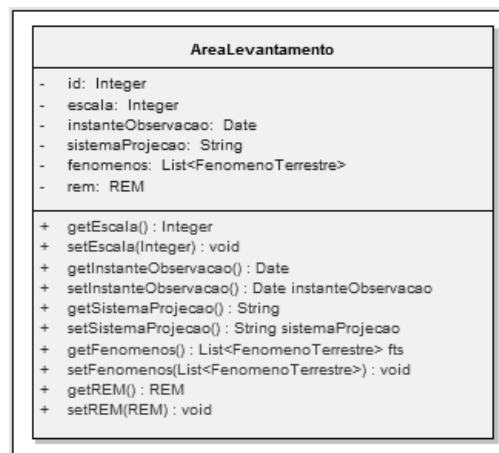
- a) Classe *Recobrimento*: Um objeto desta classe tem por responsabilidade manter as diversas associações com os objetos da classe *AreaLevantamento* por meio de uma lista de objetos. Um objeto da classe *Recobrimento* também se relaciona com um único objeto da classe *REM*, o qual lhe confere o retângulo envolvente mínimo do recobrimento. Como o modelo temporal de retratos sequencias captura o fenômeno terrestre completo num instante de tempo, por meio de um objeto da classe *AreaLevantamento*, a cronologia de uma sequência de instantes é capturada por um conjunto de objetos desta classe. O objeto que se associa a múltiplos objetos desta classe é o objeto da classe *Recobrimento*. Logo, a classe *Recobrimento* é a classe mais indicada para receber operadores temporais. Um operador temporal, que calcula a variação da densidade de drenagem de uma rede de drenagem ao longo de diversos levantamentos registrados no tempo, foi criado e denominou-se “*varDensidadeDrenagem()*” (fig. 40).

FIGURA 40 - CLASSE *Recobrimento*

Fonte: VIEIRA (2004)

NOTA: Adaptado de VIEIRA (2004)

- b) A classe *AreaLevantamento* fornece a estrutura que descreve os objetos relativos às áreas de levantamento, referidas a uma região geográfica e delimitada pelo objeto da classe *REM*, para um instante de observação *instanteObservacao*, para uma certa escala *escala* e num certo sistema de projeção. Os objetos da classe *AreaLevantamento* possuem uma lista de objetos da classe *FenomenoTerrestre* associados ao objeto da classe *AreaLevantamento* (fig. 41).

FIGURA 41 - CLASSE *AreaLevantamento*

Fonte: O autor (2008)

NOTA: Adaptado de VIEIRA (2004)

- c) A classe *FenomenoTerrestre* é uma classe abstrata que fornece os membros que descrevem um fenômeno terrestre de forma geral. A partir dela, especializações em classes distintas devem ser realizadas para as diversas classes de fenômenos em que o pesquisador tem interesse. É o caso de corpos hídricos e redes de drenagem. Classes que herdam da

classe *FenomenoTerrestre* implementam os membros descritos por ela. Objetos destas novas classes especializadas passam, por consequência, a compor a lista de objetos do objeto da classe *AreaLevantamento* (fig. 42).

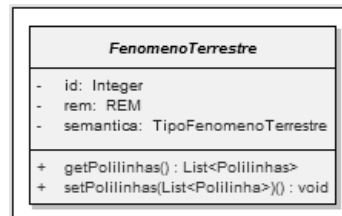


FIGURA 42 - CLASSE *FenomenoTerrestre*

Fonte: VIEIRA (2004)

NOTA: Adaptado de VIEIRA (2004)

d) A classe *RedeDeDrenagem* é uma especialização da classe *CorpoHidrico* e incorpora, além dos membros descritos por esta, novos membros advindos da necessidade desta especialização (fig. 43).

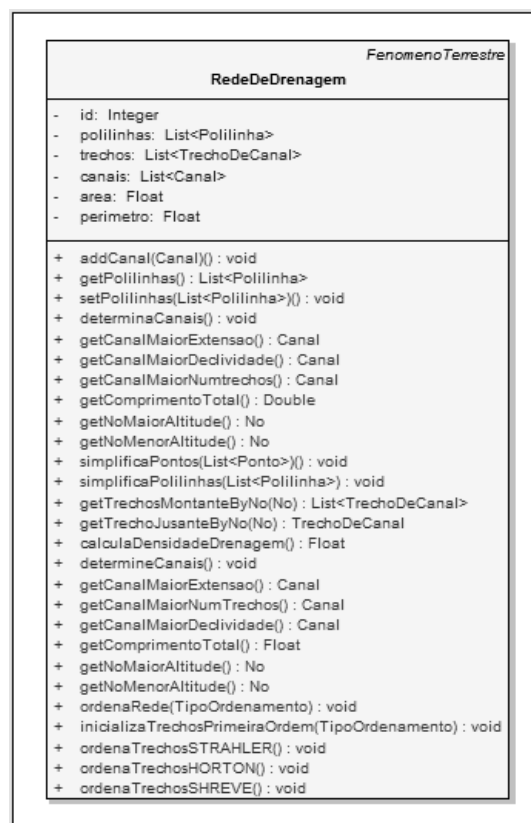


FIGURA 43 - CLASSE *RedeDeDrenagem*

FONTE: O autor (2008)

- e) A classe *TrechoDeCanal* forma uma associação “todo-parte” com a classe *RedeDeDrenagem* e é responsável pela produção dos ordenamentos para cada um dos três métodos vistos anteriormente (fig. 44).

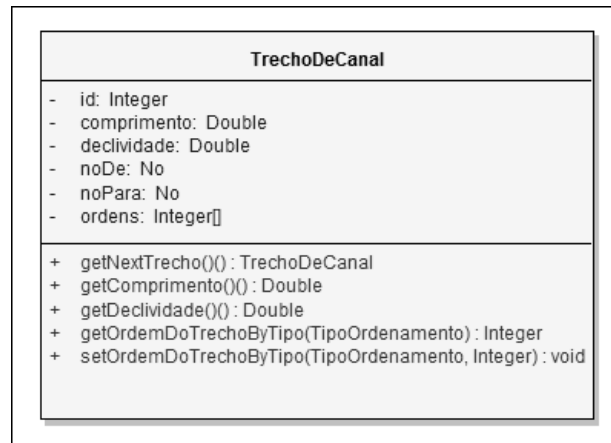


FIGURA 44 - CLASSE *TrechoDeCanal*
 FONTE: O autor (2008)

- f) A classe *Canal* é responsável por estabelecer a lista de trechos de canais compreendida entre o nó nascente e o nó foz da rede de drenagem. Esta classe tem um operador que facilita a descoberta do próximo trecho de canal de um determinado objeto da classe *TrechoDeCanal* (fig. 45).

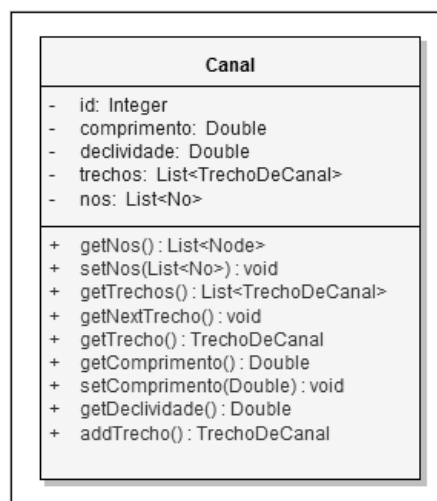


FIGURA 45 - CLASSE *Canal*
 FONTE: O autor (2008)

4.2 O PROTÓTIPO DE SOFTWARE DESENVOLVIDO

Um protótipo em linguagem Java foi desenvolvido utilizando-se o ambiente NetBeans® com o intuito de exercitar o modelo de classes, a partir de dados provenientes de digitalização de cartas topográficas e de processo de extração de redes de drenagem. Tomou-se como parte da preocupação no desenvolvimento a separação em pacotes de classes conforme a natureza delas: objetos de entidades da aplicação (cujo domínio é rede de drenagem), objetos de controle (manuseio e leitura de arquivos) e objetos de fronteira (navegação e visualização). Esta separação propiciou robustez ao protótipo quanto à manutenção e independência entre as naturezas das classes. O desenvolvimento deste protótipo possibilitou aperfeiçoar o modelo de classes inicialmente concebido, introduzindo-se correções na especificação de atributos, nos operadores, nas assinaturas dos parâmetros dos operadores e em relacionamentos das classes.

Um dos recursos fundamentais do protótipo foi possibilitar a determinação da topologia da rede, a partir de polilinhas disjuntas. Conforme proposto na metodologia descrita, logo após a leitura de todas as polilinhas de uma rede de drenagem, o protótipo realiza uma simplificação de polilinhas, procurando unir polilinhas disjuntas a partir da verificação da coincidência dos seus pontos extremos. Em seguida, o protótipo determina os retângulos mínimos envolventes e procede com as determinações dos nós de nascentes, confluências e foz. Finalmente, os trechos de canais e os canais em si são determinados, obtendo-se a rede de drenagem completa.

A interface gráfica do protótipo permitiu ativar e desativar seletivamente a visualização gráfica de elementos da rede de drenagem, obtida pela instanciação dos objetos do modelo. Ela também auxiliou na visualização temporal de uma mesma rede em épocas de levantamentos distintas, utilizando-se de variáveis visuais do tipo tamanho e valor de cor, associado ao tom de cor azul. Com outra funcionalidade denominada “explorador de objetos”, foi possível verificar, na forma de saída textual, a lista de objetos instanciados, seus valores métricos, como comprimento e declividade de canais e de topologia, como a indicação da ordem dos trechos de canais, obtidos ao longo dos canais da rede de drenagem. O protótipo

possibilitou a realização de testes práticos sobre os objetos das classes do modelo, algumas vezes favorecendo melhorias no próprio modelo inicialmente criado. Os valores obtidos pela execução dos operadores dos objetos das classes puderam ser comparados e confirmados com a leitura direta nas cartas topográficas pelo software ArcGIS®.

Um conjunto mínimo de requisitos foi estabelecido para o protótipo. Estes requisitos foram:

- 1) interface gráfica para uso de componentes gráficos, como janelas, botões, caixas de listas de itens, entre outros;
- 2) uso de janela de busca e seleção de arquivos de dados;
- 3) leitura de arquivos de dados, na forma de textos (ASCII);
- 4) interpretação e crítica de dados;
- 5) operadores de classes para geração da rede, incluindo determinação de interseções e determinação de topologia;
- 6) um operador para exercitar a temporalidade do modelo;
- 7) um operador para implementar um método de ordenamento estudado;
- 8) explorador de objetos da rede;
- 9) desenhador de elementos 2D de rede de drenagem para uma rede de drenagem com possibilidade de visualização seletiva destes elementos, ou para até três redes provenientes do experimento de temporalidade.

O projeto foi dividido em três pacotes de classes (*packages*), com a finalidade de agrupar funcionalidades semelhantes e de prover maior independência entre elas. Os três pacotes receberam os nomes de: *app*, *drenagem* e *layout* (fig. 46). Desta forma, o pacote *app* reuniu as classes e métodos gerais da aplicação, como operadores de manipulação de arquivos e leitura de registros. O pacote *drenagem* contemplou as classes diretamente relacionadas ao modelo de rede de drenagem. Finalmente, o pacote *layout* isolou as classes de montagem e tratamento da interface gráfica.

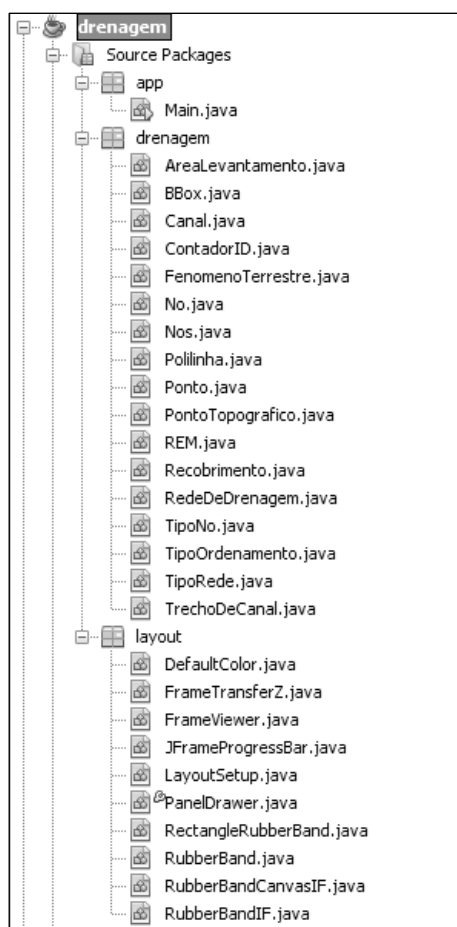


FIGURA 46 - PACOTES (*Packages*) DAS CLASSES DO PROTÓTIPO
 FONTE: O autor (2008)

Para a leitura dos arquivos de dados, alguns operadores específicos foram desenvolvidos. Para a manipulação do arquivo, tratamento do tipo de registro e leitura dos dados foram criados os operadores na classe *Main*: *lerPolilinhasDoArquivo(String inputFile)*, *tratarRegistro(String registro)*, *getNovaPolilinha()* e *getPontoTopografico()*. Para a obtenção dos valores de área, perímetro e comprimento do eixo maior da bacia, foram desenvolvidos os operadores na classe *RedeDeDrenagem*: *getAreaDrenagem()*, *getPerimetroDrenagem()* e *getEixoMaiorDrenagem()*. Uma vez lido o arquivo e os diversos objetos da rede de drenagem determinados, a rede é desenhada na janela apropriada (fig. 47). Na janela principal, mais externa, existem dois botões na barra horizontal superior. O primeiro botão, com o título “Selecionar...”, abre uma nova janela, a mais interna na figura.

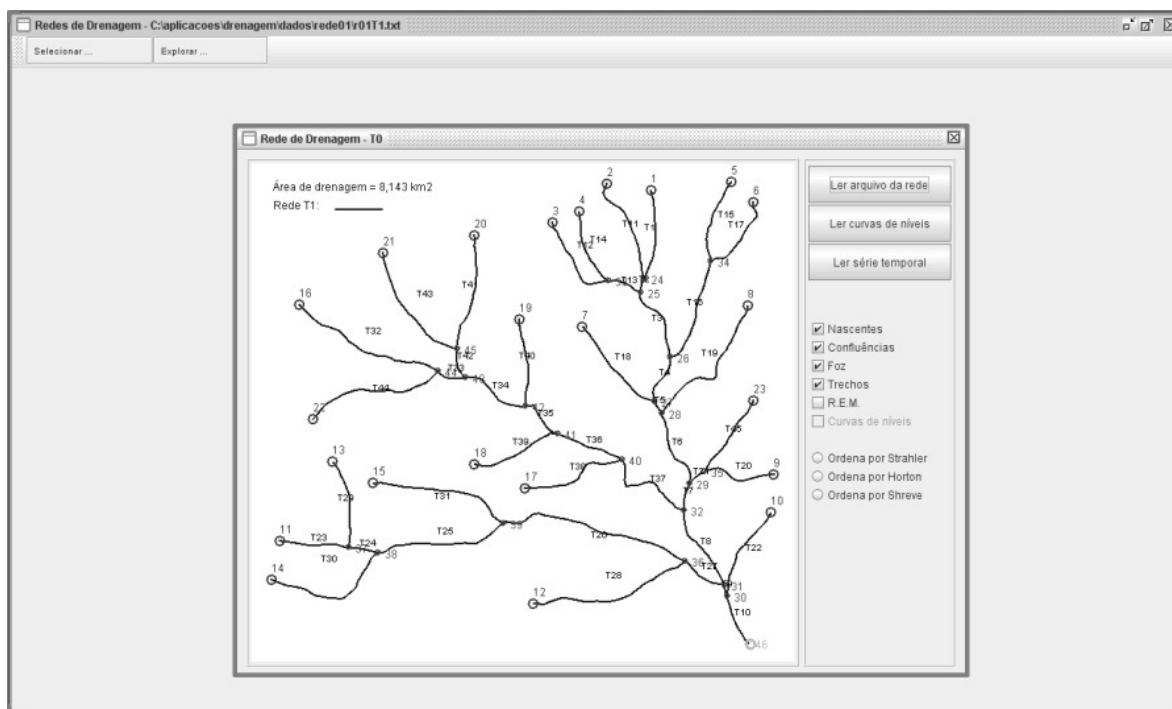


FIGURA 47 - JANELA PRINCIPAL E JANELA DA REDE DE DRENAGEM DO PROTÓTIPO
FONTE: O autor (2008)

Pressionando-se o botão “Ler arquivo da rede” desta janela, abre-se uma janela de diálogo (fig. 48) para selecionar um novo conjunto de arquivos de uma rede de drenagem. Navega-se então até a pasta de arquivos de dados, seleciona-se um arquivo específico e pressiona-se o botão “Open” para iniciar a leitura dos dados.

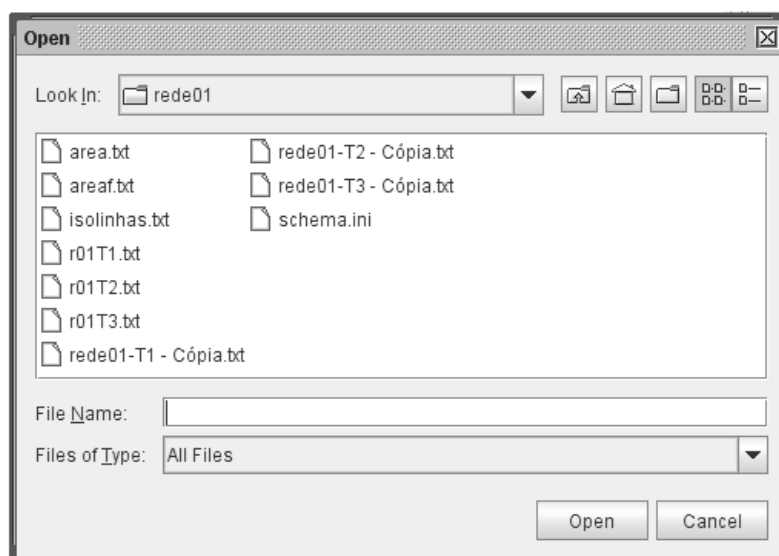


FIGURA 48 - DIÁLOGO DE PROCURA DO ARQUIVO DE DADOS DE ENTRADA
FONTE: O autor (2008)

É possível ativar a visualização dos objetos da classe *REM* (Retângulos Envolventes Mínimos) no protótipo. Para isso, na janela de visualização da rede de drenagem, marca-se a caixa de seleção para visualização dos REMs dos trechos de canais da rede de drenagem atualmente selecionada. O protótipo responde com uma nova visualização, conforme a figura 49.

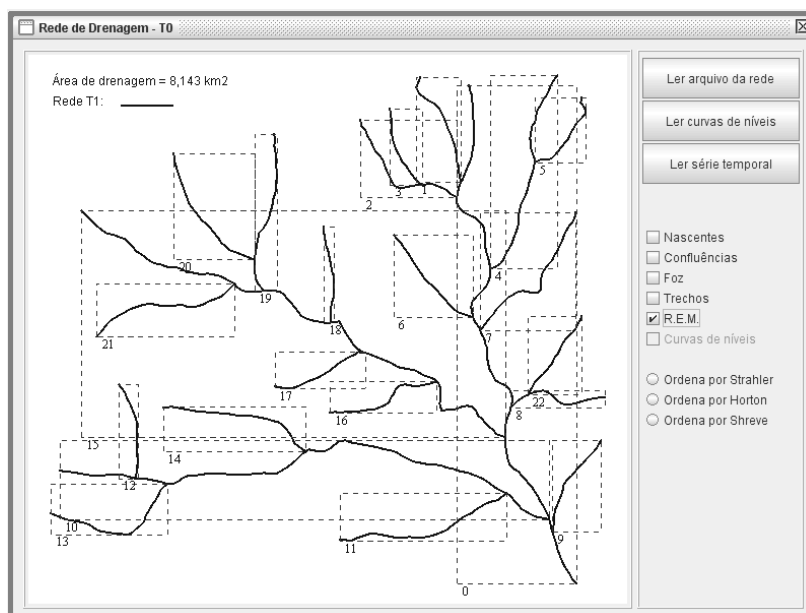


FIGURA 49 - RETÂNGULOS ENVOLVENTES MÍNIMOS DOS TRECHOS DE CANAIS
FONTE: O autor (2008)

A determinação da topologia da rede de drenagem, a partir de polilinhas disjuntas, é uma das funcionalidades fundamentais do protótipo. O processo desta determinação está detalhado na metodologia apresentada.

Outra funcionalidade possível é a de apresentar as curvas de níveis juntamente com a visualização dos objetos da rede de drenagem produzidos. Por meio do botão “Ler curvas de níveis”, o protótipo solicita, por meio de uma janela de diálogo, o arquivo que contém as curvas de níveis para a leitura. Para se visualizar as isolinhas lidas, marca-se a caixa de seleção respectiva (fig. 50).

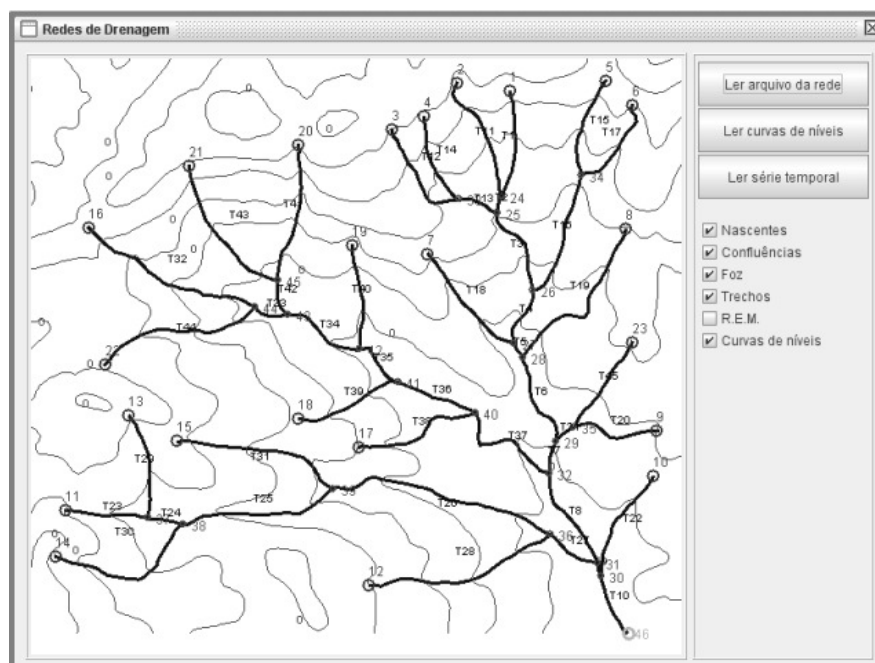


FIGURA 50 - VISUALIZAÇÃO DA REDE E CURVAS DE NÍVEIS
 FONTE: O autor (2008)

O segundo botão da janela principal (fig. 47), de título “Explorar...”, realiza consulta sobre os objetos da rede de drenagem, apresentando os valores geométricos e de topologia da rede de drenagem atualmente selecionada (fig. 51 e 52). Os resultados dos valores dos objetos para as redes de drenagem dos experimentos foram obtidos por meio desta funcionalidade e foram transcritos nos resultados obtidos deste trabalho.

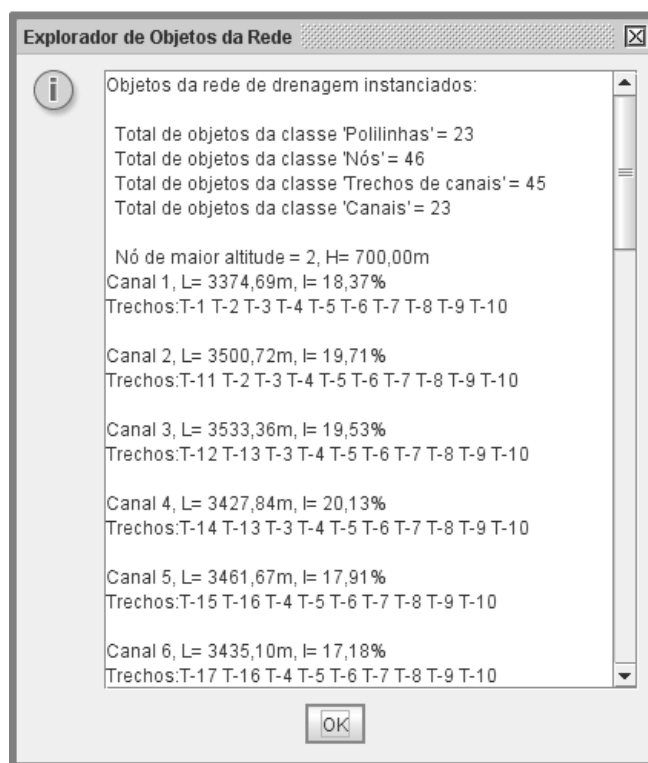


FIGURA 51 - EXPLORADOR DOS MÉTODOS DOS OBJETOS DA REDE
FONTE: O autor (2008)

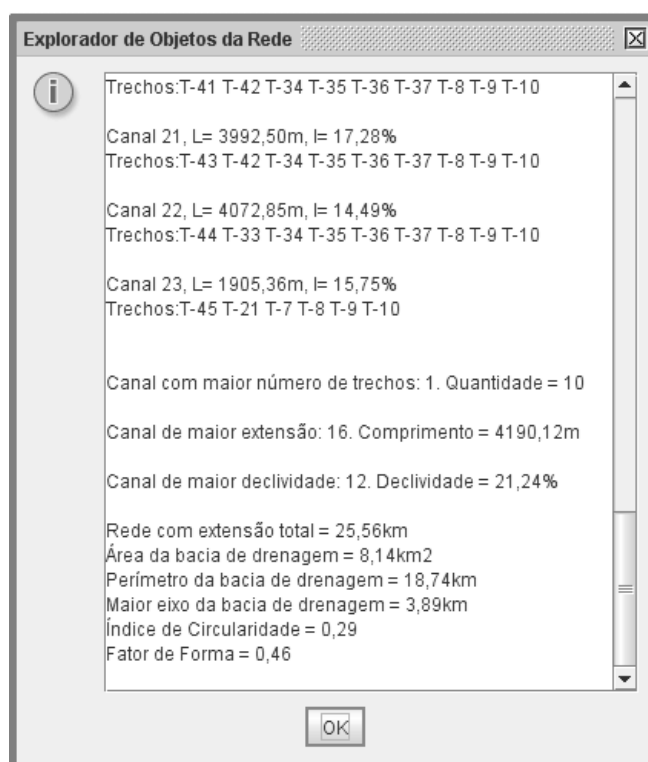


FIGURA 52 - ROLAGEM DA TELA DA FIGURA ANTERIOR
FONTE: O autor (2008)

4.3 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Foram realizados três experimentos tomando-se como entrada redes de drenagem distintas: as duas primeiras provenientes de processos de digitalização manual e a terceira por extração automatizada, a partir de um conjunto de pontos altimétricos. Os dois primeiros arquivos de dados apresentaram dados de altimetria e puderam testar os métodos que calculam declividades. Já o terceiro arquivo, produzido pela vetorização do processo de extração de redes, não conteve dados de altitudes e a geração de informações de declividades não pôde ser obtida.

Para os três experimentos, os nós nascentes são apresentados por círculos em vermelho; os nós de confluência por círculos em magenta; o nó foz por um círculo verde. Os trechos de canais são identificados com a toponíma formada pela letra “T” concatenada com a numeração sequencial produzida na determinação dos trechos pelo software. Para efeito de acompanhamento nas imagens com os resultados das listas de valores obtidos, o número do nó nascente em vermelho de cada canal coincide com o número do respectivo canal na lista de valores obtidos, lembrando que cada canal inicia-se num nó nascente e termina no nó foz.

A tabela 4 apresenta o resumo dos resultados dos experimentos para as principais características das redes de drenagem. Os valores e a lista de canais e seus respectivos trechos foram obtidos após os diversos objetos da rede de drenagem terem sido instanciados, para um determinado arquivo de dados utilizado, e foram capturados da janela de resultados criada pela utilização do botão “Explorar...” da janela principal do protótipo. A visualização das redes de drenagem obtidas está nas figuras 53, 54 e 55.

TABELA 4 - RESUMO DOS RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

Característica	Rede de Drenagem		
Número da rede	1	2	3
Escala aprox.	1:20.000	1:5.000	1:10.000
L Total (km)	25,56	3,61	11,06
L max. (km)	3,89	0,56	1,61
A (km ²)	8,14	0,25	1,32
Dd (km/km ²)	3,14	14,35	8,36
P (km)	18,741	3,568	8,108
Ff	0,46	0,80	0,51
IC	0,29	0,25	0,25
Total de canais	23	19	33
Total de trechos	45	37	65
Total de nós	46	38	66
Declividade máxima (em %)	21,2	24,7	ND

FONTE: O autor (2008)

Para o conjunto de dados da rede de drenagem nº 1, o protótipo apresentou a visualização ilustrada pela figura 53:

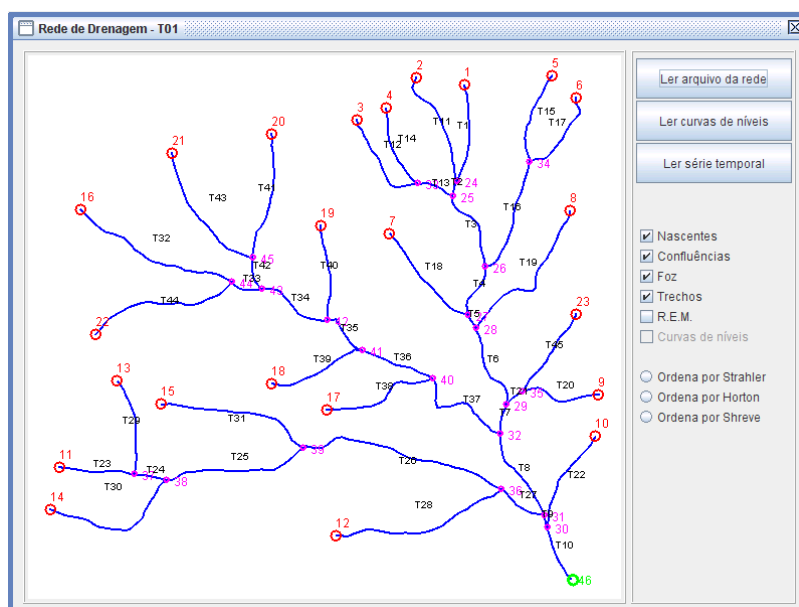


FIGURA 53 - REDE Nº 1 E SEUS ELEMENTOS VISUALIZADOS NO PROTÓTIPO
FONTE: O autor (2008)

Resultados produzidos pelo protótipo para a rede de drenagem nº 1:

Objetos da rede de drenagem instanciados:

Total de objetos da classe 'Polilinhas' = 23

Total de objetos da classe 'Nós' = 46

Total de objetos da classe 'Trechos de canais' = 45

Total de objetos da classe 'Canais' = 23

Nó de maior altitude = 2, H= 700,00m

Canal 1, L= 3374,69m, I= 18,37%

Trechos:T-1 T-2 T-3 T-4 T-5 T-6 T-7 T-8 T-9 T-10

Canal 2, L= 3500,72m, I= 19,71%

Trechos:T-11 T-2 T-3 T-4 T-5 T-6 T-7 T-8 T-9 T-10

Canal 3, L= 3533,36m, I= 19,53%

Trechos:T-12 T-13 T-3 T-4 T-5 T-6 T-7 T-8 T-9 T-10

Canal 4, L= 3427,84m, I= 20,13%

Trechos:T-14 T-13 T-3 T-4 T-5 T-6 T-7 T-8 T-9 T-10

Canal 5, L= 3461,67m, I= 17,91%

Trechos:T-15 T-16 T-4 T-5 T-6 T-7 T-8 T-9 T-10

Canal 6, L= 3435,10m, I= 17,18%

Trechos:T-17 T-16 T-4 T-5 T-6 T-7 T-8 T-9 T-10

Canal 7, L= 2535,11m, I= 15,38%

Trechos:T-18 T-5 T-6 T-7 T-8 T-9 T-10

Canal 8, L= 2741,48m, I= 14,23%

Trechos:T-19 T-6 T-7 T-8 T-9 T-10

Canal 9, L= 1830,19m, I= 10,38%

Trechos:T-20 T-21 T-7 T-8 T-9 T-10

Canal 10, L= 1001,31m, I= 14,98%

Trechos:T-22 T-10

Canal 11, L= 3613,18m, I= 13,56%

Trechos:T-23 T-24 T-25 T-26 T-27 T-9 T-10

Canal 12, L= 1836,18m, I= 21,24%

Trechos:T-28 T-27 T-9 T-10

Canal 13, L= 3753,14m, I= 15,72%

Trechos:T-29 T-24 T-25 T-26 T-27 T-9 T-10

Canal 14, L= 3841,56m, I= 15,36%

Trechos:T-30 T-25 T-26 T-27 T-9 T-10

Canal 15, L= 3009,73m, I= 16,95%

Trechos:T-31 T-26 T-27 T-9 T-10

Canal 16, L= 4190,12m, I= 15,27%

Trechos:T-32 T-33 T-34 T-35 T-36 T-37 T-8 T-9 T-10

Canal 17, L= 2392,37m, I= 12,12%

Trechos:T-38 T-37 T-8 T-9 T-10

Canal 18, L= 2746,49m, I= 13,47%

Trechos:T-39 T-36 T-37 T-8 T-9 T-10

Canal 19, L= 3037,12m, I= 12,18%

Trechos:T-40 T-35 T-36 T-37 T-8 T-9 T-10

Canal 20, L= 3920,51m, I= 17,60%

Trechos:T-41 T-42 T-34 T-35 T-36 T-37 T-8 T-9 T-10

Canal 21, L= 3992,50m, I= 17,28%

Trechos:T-43 T-42 T-34 T-35 T-36 T-37 T-8 T-9 T-10

Canal 22, L= 4072,85m, I= 14,49%

Trechos:T-44 T-33 T-34 T-35 T-36 T-37 T-8 T-9 T-10

Canal 23, L= 1905,36m, I= 15,75%

Trechos:T-45 T-21 T-7 T-8 T-9 T-10

Canal com maior número de trechos: 1. Quantidade = 10

Canal de maior extensão: 16. Comprimento = 4190,12m

Canal de maior declividade: 12. Declividade = 21,24%

Rede com extensão total = 25,56km

Área da bacia de drenagem = 8,14km²

Densidade de drenagem = 3,14km/km²

Perímetro da bacia de drenagem = 18,74km

Maior eixo da bacia de drenagem = 3,89km

Índice de Circularidade = 0,29

Fator de Forma = 0,46

A segunda rede de drenagem submetida ao protótipo também foi obtida por digitalização de carta topográfica e é apresentada na figura 54.

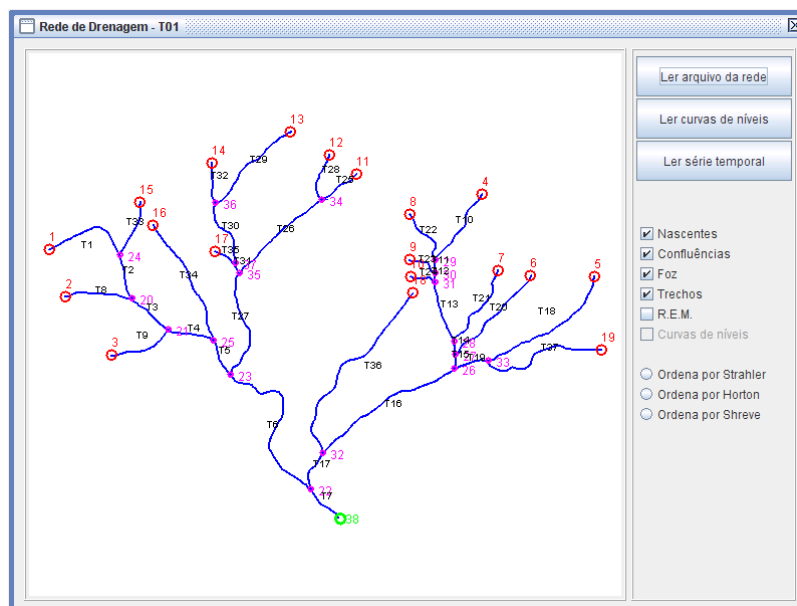


FIGURA 54 - REDE Nº 2 E SEUS ELEMENTOS VISUALIZADOS NO PROTÓTIPO
FONTE: O autor (2008)

Resultados produzidos pelo protótipo para a rede de drenagem nº 2:

Objetos da rede de drenagem instanciados:

Total de objetos da classe 'Polilinhas' = 19

Total de objetos da classe 'Nós' = 38

Total de objetos da classe 'Trechos de canais' = 37

Total de objetos da classe 'Canais' = 19

Nó de maior altitude = 19, H= 650,54m

Canal 1, L= 672,13m, I= 12,88%

Trechos:T-1 T-2 T-3 T-4 T-5 T-6 T-7

Canal 2, L= 577,15m, I= 12,24%

Trechos:T-8 T-3 T-4 T-5 T-6 T-7

Canal 3, L= 506,52m, I= 11,79%

Trechos:T-9 T-4 T-5 T-6 T-7

Canal 4, L= 603,83m, I= 15,95%

Trechos:T-10 T-11 T-12 T-13 T-14 T-15 T-16 T-17 T-7

Canal 5, L= 580,34m, I= 23,38%

Trechos:T-18 T-19 T-16 T-17 T-7

Canal 6, L= 507,87m, I= 15,18%
Trechos:T-20 T-15 T-16 T-17 T-7

Canal 7, L= 494,86m, I= 16,17%
Trechos:T-21 T-14 T-15 T-16 T-17 T-7

Canal 8, L= 568,30m, I= 20,89%
Trechos:T-22 T-11 T-12 T-13 T-14 T-15 T-16 T-17 T-7

Canal 9, L= 513,47m, I= 17,64%
Trechos:T-23 T-12 T-13 T-14 T-15 T-16 T-17 T-7

Canal 10, L= 495,36m, I= 17,25%
Trechos:T-24 T-13 T-14 T-15 T-16 T-17 T-7

Canal 11, L= 669,37m, I= 19,36%
Trechos:T-25 T-26 T-27 T-6 T-7

Canal 12, L= 677,25m, I= 19,52%
Trechos:T-28 T-26 T-27 T-6 T-7

Canal 13, L= 711,92m, I= 15,11%
Trechos:T-29 T-30 T-31 T-27 T-6 T-7

Canal 14, L= 621,63m, I= 11,49%
Trechos:T-32 T-30 T-31 T-27 T-6 T-7

Canal 15, L= 627,35m, I= 7,07%
Trechos:T-33 T-2 T-3 T-4 T-5 T-6 T-7

Canal 16, L= 536,17m, I= 7,93%
Trechos:T-34 T-5 T-6 T-7

Canal 17, L= 502,40m, I= 7,00%
Trechos:T-35 T-31 T-27 T-6 T-7

Canal 18, L= 397,19m, I= 19,41%
Trechos:T-36 T-17 T-7

Canal 19, L= 562,89m, I= 24,71%
Trechos:T-37 T-19 T-16 T-17 T-7

Canal com maior número de trechos: 4. Quantidade = 9
Canal de maior extensão: 13. Comprimento = 711,92m
Canal de maior declividade: 19. Declividade = 24,71%
Rede com extensão total = 3,61km
Área da bacia de drenagem = 0,25km²
Densidade de drenagem = 14,35km/km²
Perímetro da bacia de drenagem = 3,57km

Maior eixo da bacia de drenagem = 0,56km

Índice de Circularidade = 0,25

Fator de Forma = 0,80

A terceira rede de drenagem dos experimentos é uma rede resultante do processo de extração descrito no apêndice 2. No protótipo, a rede de drenagem Nº 3 foi visualizada conforme a figura 55.

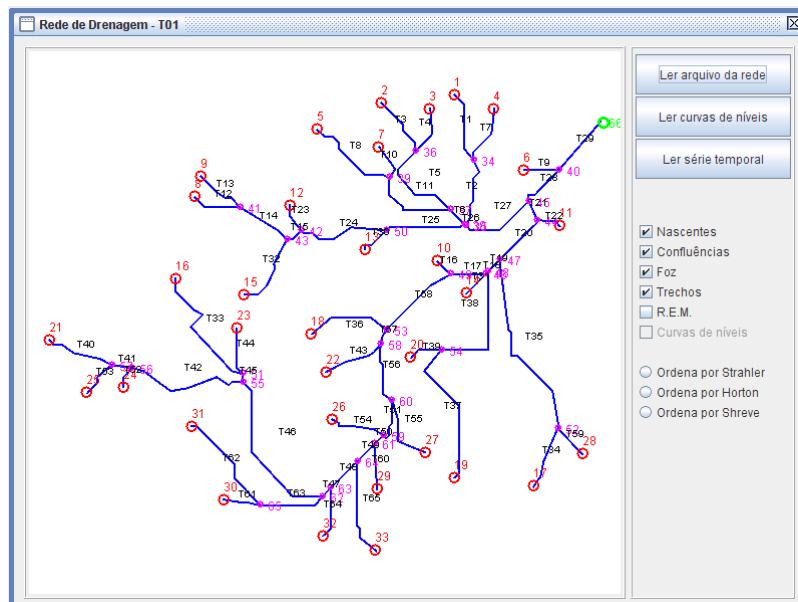


FIGURA 55 - REDE Nº 3 E SEUS ELEMENTOS VISUALIZADOS NO PROTÓTIPO
FONTE: O autor (2008)

Resultados produzidos pelo protótipo para a rede de drenagem nº 3:

Objetos da rede de drenagem instanciados:

Total de objetos da classe 'Polilinhas' = 33

Total de objetos da classe 'Nós' = 66

Total de objetos da classe 'Trechos de canais' = 65

Total de objetos da classe 'Canais' = 33

Canal 1, L= 971,26m, I= 0,00%

Trechos:T-1 T-2 T-27 T-28 T-29

Canal 2, L= 1084,76m, I= 0,00%

Trechos:T-3 T-5 T-6 T-26 T-27 T-28 T-29

Canal 3, L= 1048,64m, I= 0,00%

Trechos:T-4 T-5 T-6 T-26 T-27 T-28 T-29

Canal 4, L= 929,26m, I= 0,00%

Trechos:T-7 T-2 T-27 T-28 T-29

Canal 5, L= 1142,04m, I= 0,00%

Trechos:T-8 T-11 T-6 T-26 T-27 T-28 T-29

Canal 6, L= 287,57m, I= 0,00%

Trechos:T-9 T-29

Canal 7, L= 975,79m, I= 0,00%

Trechos:T-10 T-11 T-6 T-26 T-27 T-28 T-29

Canal 8, L= 1424,88m, I= 0,00%

Trechos:T-12 T-14 T-15 T-24 T-25 T-26 T-27 T-28 T-29

Canal 9, L= 1430,68m, I= 0,00%

Trechos:T-13 T-14 T-15 T-24 T-25 T-26 T-27 T-28 T-29

Canal 10, L= 761,64m, I= 0,00%

Trechos:T-16 T-17 T-18 T-19 T-20 T-21 T-28 T-29

Canal 11, L= 455,66m, I= 0,00%

Trechos:T-22 T-21 T-28 T-29

Canal 12, L= 1144,15m, I= 0,00%

Trechos:T-23 T-24 T-25 T-26 T-27 T-28 T-29

Canal 13, L= 880,27m, I= 0,00%

Trechos:T-30 T-25 T-26 T-27 T-28 T-29

Canal 14, L= 683,13m, I= 0,00%

Trechos:T-31 T-18 T-19 T-20 T-21 T-28 T-29

Canal 15, L= 1340,07m, I= 0,00%

Trechos:T-32 T-15 T-24 T-25 T-26 T-27 T-28 T-29

Canal 16, L= 2473,27m, I= 0,00%

Trechos:T-33 T-45 T-46 T-47 T-48 T-49 T-50 T-51 T-56 T-57 T-58 T-17 T-18 T-19 T-20 T-21 T-28 T-29

Canal 17, L= 1289,81m, I= 0,00%

Trechos:T-34 T-35 T-20 T-21 T-28 T-29

Canal 18, L= 1205,30m, I= 0,00%

Trechos:T-36 T-58 T-17 T-18 T-19 T-20 T-21 T-28 T-29

Canal 19, L= 1399,64m, I= 0,00%

Trechos:T-37 T-38 T-19 T-20 T-21 T-28 T-29

Canal 20, L= 1059,16m, I= 0,00%

Trechos:T-39 T-38 T-19 T-20 T-21 T-28 T-29

Canal 21, L= 2676,89m, I= 0,00%

Trechos:T-40 T-41 T-42 T-46 T-47 T-48 T-49 T-50 T-51 T-56 T-57 T-58 T-17 T-18 T-19 T-20 T-21 T-28 T-29

Canal 22, L= 1187,56m, I= 0,00%

Trechos:T-43 T-57 T-58 T-17 T-18 T-19 T-20 T-21 T-28 T-29

Canal 23, L= 2211,67m, I= 0,00%

Trechos:T-44 T-45 T-46 T-47 T-48 T-49 T-50 T-51 T-56 T-57 T-58 T-17 T-18 T-19 T-20 T-21 T-28 T-29

Canal 24, L= 2478,80m, I= 0,00%

Trechos:T-52 T-42 T-46 T-47 T-48 T-49 T-50 T-51 T-56 T-57 T-58 T-17 T-18 T-19 T-20 T-21 T-28 T-29

Canal 25, L= 2587,35m, I= 0,00%

Trechos:T-53 T-41 T-42 T-46 T-47 T-48 T-49 T-50 T-51 T-56 T-57 T-58 T-17 T-18 T-19 T-20 T-21 T-28 T-29

Canal 26, L= 1482,40m, I= 0,00%

Trechos:T-54 T-51 T-56 T-57 T-58 T-17 T-18 T-19 T-20 T-21 T-28 T-29

Canal 27, L= 1394,69m, I= 0,00%

Trechos:T-55 T-56 T-57 T-58 T-17 T-18 T-19 T-20 T-21 T-28 T-29

Canal 28, L= 1210,63m, I= 0,00%

Trechos:T-59 T-35 T-20 T-21 T-28 T-29

Canal 29, L= 1483,96m, I= 0,00%

Trechos:T-60 T-50 T-51 T-56 T-57 T-58 T-17 T-18 T-19 T-20 T-21 T-28 T-29

Canal 30, L= 1869,76m, I= 0,00%

Trechos:T-61 T-63 T-47 T-48 T-49 T-50 T-51 T-56 T-57 T-58 T-17 T-18 T-19 T-20 T-21 T-28 T-29

Canal 31, L= 2083,01m, I= 0,00%

Trechos:T-62 T-63 T-47 T-48 T-49 T-50 T-51 T-56 T-57 T-58 T-17 T-18 T-19 T-20 T-21 T-28 T-29

Canal 32, L= 1682,70m, I= 0,00%

Trechos:T-64 T-48 T-49 T-50 T-51 T-56 T-57 T-58 T-17 T-18 T-19 T-20 T-21 T-28 T-29

Canal 33, L= 1710,58m, I= 0,00%

Trechos:T-65 T-49 T-50 T-51 T-56 T-57 T-58 T-17 T-18 T-19 T-20 T-21 T-28 T-29

Canal com maior número de trechos: 21. Quantidade = 19

Canal de maior extensão: 21. Comprimento = 2676,89m

Rede com extensão total = 11,06km

Área da bacia de drenagem = 1,32km²

Densidade de drenagem = 8,36km/km²
 Perímetro da bacia de drenagem = 8,11km
 Maior eixo da bacia de drenagem = 1,61km
 Índice de Circularidade = 0,25
 Fator de Forma = 0,51

As medidas lineares de uma amostra de canais obtidas pelo modelo implementado no protótipo de software foram confrontadas com as leituras obtidas no software ArcGIS© para cada rede de drenagem e agrupadas nas tabelas 5, 6 e 7:

TABELA 5 - LEITURAS OBTIDAS PARA A REDE DE DRENAGEM Nº 1

Canal	Modelo (m)	ArcGIS© (m)	Diferença (%)
1	3.374,69	3.374,68	0,00
6	3.435,10	3.408,78	-0,77
10	1.001,31	1.001,10	-0,02
12	1.836,18	1.811,98	-1,32
14	3841,56	3.812,46	-0,76
16	4.190,12	4.152,23	-0,90

FONTE: O autor (2008)

TABELA 6 - LEITURAS OBTIDAS PARA A REDE DE DRENAGEM Nº 2

Canal	Modelo (m)	ArcGIS© (m)	Diferença (%)
1	672,13	672,12	0,00
4	603,83	603,82	0,00
5	580,34	579,9	-0,08
14	621,63	620,73	-0,14
19	562,89	562,21	-0,12

FONTE: O autor (2008)

TABELA 7 - LEITURAS OBTIDAS PARA A REDE DE DRENAGEM Nº 3

Canal	Modelo (m)	ArcGIS© (m)	Diferença (%)
1	971,26	971,23	0,00
12	1.144,15	1.144,14	0,00
21	2.676,89	2.675,5	-0,05
33	1.710,58	1.709,18	-0,08
28	1.210,63	1.209,52	-0,09

FONTE: O autor (2008)

O modelo proposto oferece suporte para o ordenamento de trechos de canais, segundo os métodos de Strahler, Horton e Shreve. Este ordenamento é um importante pré-requisito para atribuir e classificar graus de importância aos canais de uma rede de drenagem. Por meio desta classificação, é possível realizar a determinação do canal principal, sendo este um dos elementos indispensáveis para a obtenção de outras características físicas de uma bacia hidrográfica.

Para ilustrar esta possibilidade de ordenamento no modelo, foi implementado no protótipo o algoritmo do método de Strahler (fig. 20, equações 7 e 8, apêndice 1, item f), por meio de dois operadores definidos na classe *RedeDeDrenagem* (fig. 43):

- *inicializaTrechosPrimeiraOrdem (TipoOrdenamento tipoOrdem)*: tem por responsabilidade definir os trechos de primeira ordem a partir dos nós nascentes da rede de drenagem. Este operador pode ser comum a mais de um método de ordenamento;

- *ordenaTrechosSTRAHLER()*: tem por finalidade determinar a ordem dos demais trechos de canais até o nó foz, segundo o método de Strahler.

Embora este método não determine diretamente o canal principal de uma rede de drenagem, este método foi o escolhido para implementação no protótipo, por ser um dos métodos mais simples e por se tratar do método que é base para o método de Horton, este último possibilitando a determinação do canal principal.

Os resultados encontrados do ordenamento, para as três redes dos experimentos, estão ilustrados pelos numerais em negrito, na toponímia de cada trecho de canal (fig. 56, 57 e 58).

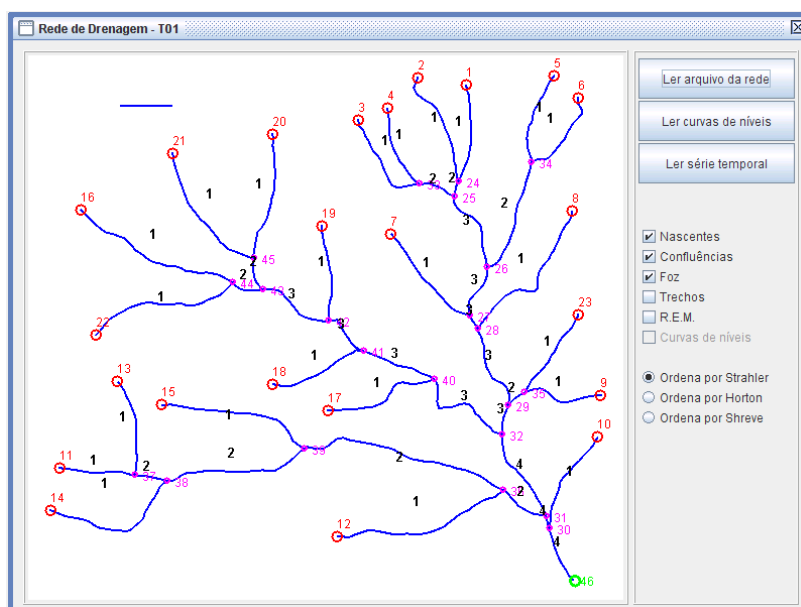


FIGURA 56 - ORDENAMENTO DE STRAHLER PARA A REDE Nº 1
FONTE: O autor (2008)

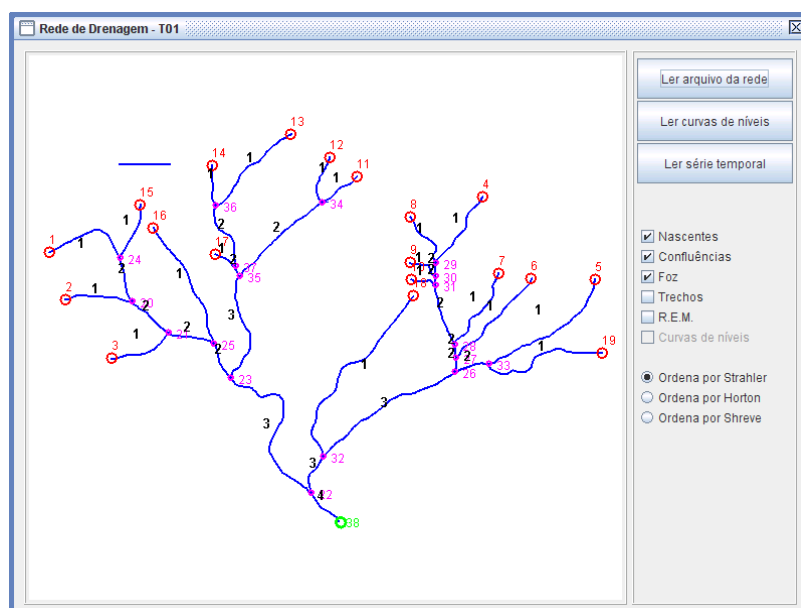


FIGURA 57 - ORDENAMENTO DE STRAHLER PARA A REDE Nº 2
FONTE: O autor (2008)

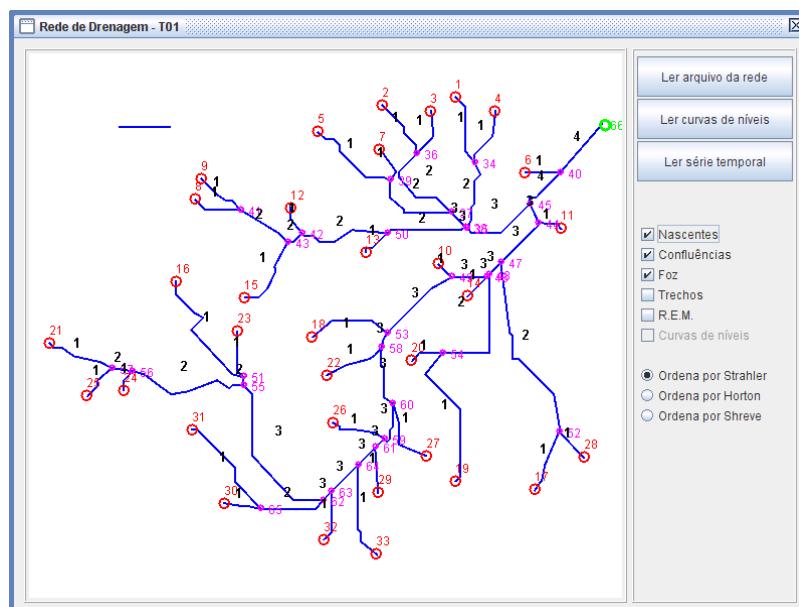


FIGURA 58 - ORDENAMENTO DE STRAHLER PARA A REDE Nº 3
FONTE: O autor (2008)

Para a série temporal, utilizou-se os dados da rede de drenagem Nº 1 para o tempo T1 e dois outros arquivos de dados simulados para os tempos T2 e T3. A simulação trabalhou principalmente com os trechos próximos às nascentes dos canais, simulando diferentes levantamentos para a mesma região geográfica. A visualização da rede de drenagem nos três instantes pode ser visualizada segundo a figura 59. Esta figura foi capturada da tela do protótipo, após pressionar o botão “Ler Série Temporal”. O desenho gráfico desta cronologia de três instantes utilizou-se de duas variáveis visuais: tamanho e valor de cor, associado a um tom de cor azul. O tamanho maior e valor de cor mais claro representam o tempo T1, o tamanho e valor de cor intermediários, o tempo T2, e o tamanho menor e valor de cor mais escuro, o tempo T3. O operador temporal *varDensidadeDrenagem()*, definido na classe *Recobrimento* (fig. 40), calculou a variação de densidade entre os instantes T2 e T1 e entre os instantes T3 e T2, apresentando valores decrescentes de densidade: 0,97 e 0,93, respectivamente. Parte do código de programação da classe *Recobrimento* encontra-se no apêndice 1.

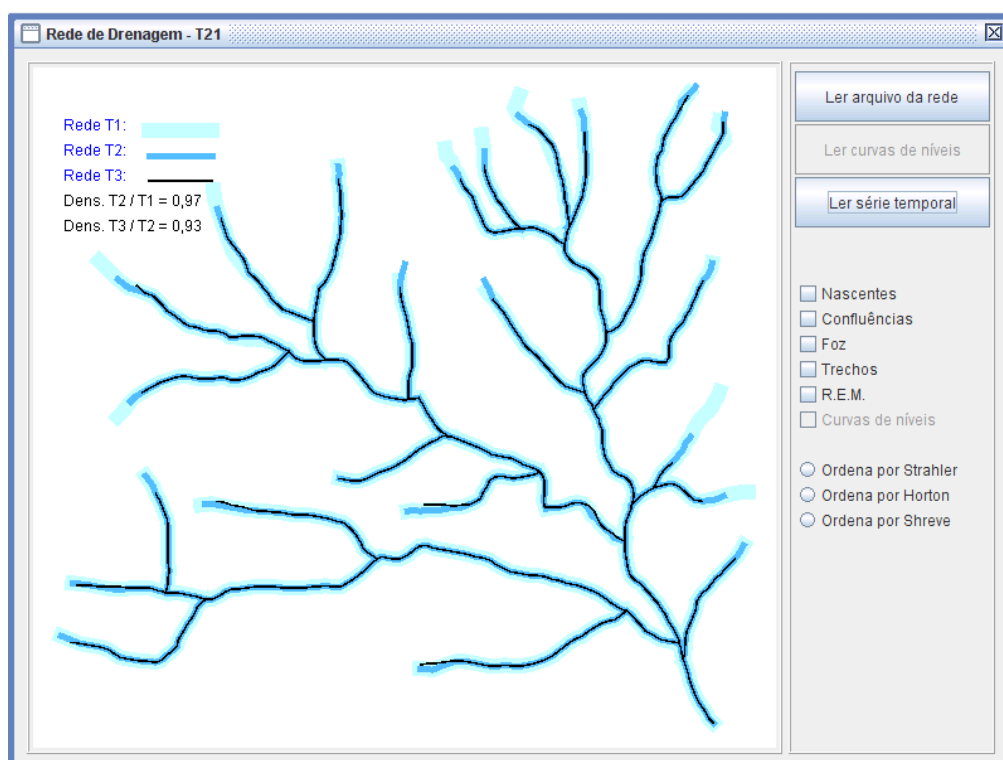


FIGURA 59 - SÉRIE TEMPORAL DE LEVANTAMENTOS PARA UMA MESMA REGIÃO
FONTE: O autor (2008)

Uma forma alternativa de visualização da rede de drenagem, de caráter ilustrativo, pode ser vista nas figuras 60 a 65, onde os arquivos de redes de drenagem foram convertidos para o formato KML e importados para o software Google Earth®. Foram utilizadas duas imagens para cada rede de drenagem, uma de topo e outra em perspectiva.



FIGURA 60 - REDE Nº 1 VISUALIZADA NO GOOGLE EARTH® (TOPO)
FONTE: O autor (2008)



FIGURA 61 - REDE Nº 1 VISUALIZADA NO GOOGLE EARTH® (PERSPECTIVA)
FONTE: O autor (2008)

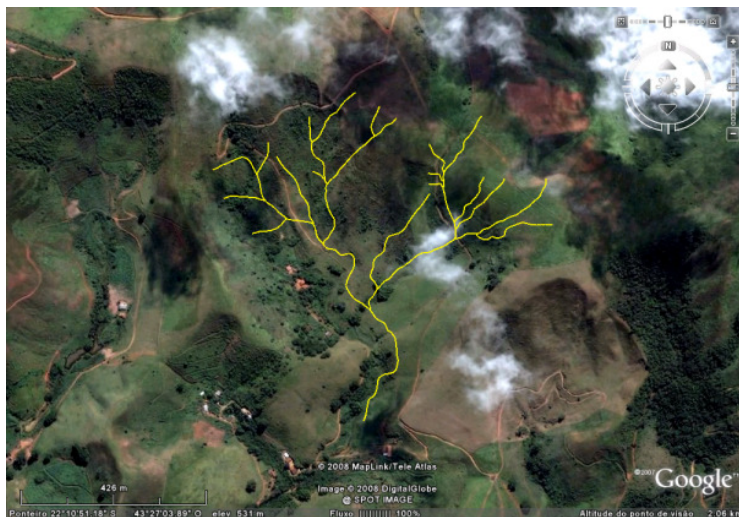


FIGURA 62 - REDE Nº 2 VISUALIZADA NO GOOGLE EARTH© (TOPO)
 FONTE: O autor (2008)



FIGURA 63 - REDE Nº 2 VISUALIZADA NO GOOGLE EARTH© (PERSPECTIVA)
 FONTE: O autor (2008)



FIGURA 64 - REDE Nº 3 VISUALIZADA NO GOOGLE EARTH© (TOPO)
 FONTE: O autor (2008)



FIGURA 65 - REDE Nº 3 VISUALIZADA NO GOOGLE EARTH© (PERSPECTIVA)
 FONTE: O autor (2008)

4.4 DISCUSSÃO DO MODELO PROPOSTO

Partindo-se do princípio de que redes de drenagem podem ser modeladas por um conjunto de classes de objetos, e que as primitivas gráficas ponto e linha podem representá-las como grafos acíclicos, o modelo possibilitou formalizar redes de drenagem como fenômenos terrestres, sob o ponto de vista da cartografia topográfica. Por se tratar de um modelo que estende o modelo mais geral e temporal de classes de objetos de fenômenos terrestres do trabalho de Vieira (2004), o modelo de redes de drenagem proposto herdou associações com levantamentos em instantes de tempo distintos, para um determinado recobrimento, possibilitando o emprego de temporalidade.

A estrutura de classes de objetos do modelo proposto atendeu à decomposição dos elementos de uma rede de drenagem, representando as associações entre eles, algumas delas do tipo “todo-parte”. Os diversos membros de classes abrigaram, segundo suas responsabilidades, as características de cada tipo de elemento da rede e os operadores para obtenção de valores métricos, de topologia, de ordenamento de trechos de canais e de temporalidade. O modelo foi utilizado no protótipo de software desenvolvido, totalizando cerca de 3.500 linhas de programação em Java. Com o recurso de uma função denominada “explorador de objetos” no protótipo, foi possível verificar a instanciação dos objetos das classes do modelo e dos relacionamentos de associações entre objetos de classes diferentes.

O modelo contemplou o tratamento do ordenamento de canais, por meio de operadores inseridos na classe *RedeDeDrenagem*, possibilitando o ordenamento segundo os três métodos clássicos de ordenamento estudados. Estes operadores definidos foram: *ordenaRede(TipoOrdenamento tipoOrdem)*, *inicializaTrechosPrimeiraOrdem (tipoOrdem)*, *ordenaTrechosSTRAHLER()*, *ordenaTrechosHORTON()* e *ordenaTrechosSHREVE()*. No protótipo foi implementado o método de ordenamento de Strahler, e resultados deste ordenamento foram obtidos e visualizados para as três redes de drenagem.

5 CONCLUSÕES

O modelo espaço-temporal de classes de objetos proposto possibilitou representar com sucesso a estrutura e comportamento de redes de drenagem e seus elementos sob o ponto de vista da cartografia topográfica. O modelo foi implementado por meio de um protótipo de software e permitiu atender às expectativas quanto à decomposição e síntese de redes de drenagem, com base nos resultados obtidos para as três redes de drenagem estudadas. O modelo proposto em notação UML especializou parte do modelo de fenômenos terrestres proposto por Vieira (2004), a partir das classes *Recobrimento*, *AreaLevantamento*, *FenomenoTerrestre* e *CorpoHidrico*. O modelo assim integrado definiu as seguintes classes principais:

- *RedeDeDrenagem*
- *Canal*
- *TrechoDeCanal*
- *TipoOrdenamento*
- *No*, *NoNascente*, *NoConfluente*, *NoFoz*
- *PontoTopografico*
- *Polilinha*
- *REM*
- *TipoRede*
- *TipoFenomenoTerrestre*

A classe *Recobrimento* ganhou neste trabalho a definição de um operador temporal, denominado *varDensidadeDrenagem()*, com o intuito de demonstrar a capacidade do modelo de acompanhar propriedades de redes de drenagem ao longo do tempo. Em função de uma simulação de dois outros levantamentos em épocas distintas, e por meio deste operador temporal, foi possível apresentar resultados tratando variabilidades numa das propriedades físicas da rede de drenagem, denominada “densidade de drenagem”, ao longo de uma série histórica.

A definição do modelo contemplou a previsão para o tratamento do ordenamento de canais de drenagem por meio de atributos e métodos definidos nas classes *RedeDeDrenagem* e *TrechoDeCanal*, segundo os três métodos clássicos: de Strahler, de Horton e de Shreve. De forma análoga ao desenvolvimento do

método de Strahler, o protótipo de software poderia ser estendido para se implementar o método de Horton, possibilitando a determinação dos canais principais das redes de drenagem.

Com este modelo obtido, torna-se viável aplicá-lo em áreas como gestão de recursos hídricos, em outorgas de recursos hídricos e em projetos de redes fluviométricas. No primeiro caso, os sistemas de informação de gestão de recursos hídricos requerem que as bacias hidrográficas sejam classificadas mediante uma codificação especial, estabelecendo uma hierarquia entre bacias. Esta codificação especial necessita que o curso d'água principal de cada bacia esteja definido e os diversos trechos de cada bacia e seus nós iniciais e finais estejam numerados, assim como conhecidos os comprimentos de cada trecho e as áreas de contribuição respectivas. Com estes dados persistidos num banco de dados espacial e com um conjunto de regras de negócio de gestão hídrica, é possível, por exemplo, a realização de consultas para seleção de bacias a montante e jusante de um determinado trecho, auxiliando na tomada de decisões sobre a divisão de unidades de gestão. No segundo caso, o da gestão de outorgas de recursos hídricos, também há necessidade de se manter uma base de dados espacial sobre canais e trechos de canais para efetivar o controle de emissão de licenças para uso da água. Associando-se os objetos caracterizados no modelo proposto de redes de drenagem, com outros atributos como dados do usuário, localização espacial do usuário, vazões consumidas e lançadas e concentração de lançamentos de efluentes, é possível controlar a qualidade resultante da água em função do usuário. Para o terceiro caso, o de projetos de redes fluviométricas, o modelo proposto pode contribuir no estudo da distribuição dos trechos e confluências de uma rede de drenagem, ambos elementos presentes no modelo proposto, para o planejamento da instalação progressiva de estações de monitoramento da qualidade d'água.

Como recomendações para o aperfeiçoamento do modelo obtido, sugere-se:

- 1) incluir tratamento para trechos de canais com margem dupla e outros elementos com poligonais fechadas. Isto possibilitaria a representação de feições mais complexas do que as representadas de forma unidimensional;

- 2) incluir novos atributos e operadores para contemplar a determinação das demais características físicas de uma rede de drenagem e sua bacia hidrográfica;
- 3) incluir tratamento de generalização cartográfica.

Para o melhoramento do protótipo desenvolvido, destacam-se as seguintes recomendações:

- 1) inserir os aspectos de visualização do protótipo no contexto de um projeto cartográfico. Esta recomendação possibilitaria definir uma linguagem cartográfica apropriada, aumentando a eficiência em termos de comunicação cartográfica;
- 2) desenvolver filtros para correção de erros de digitalização e supressão de dados expúrios, encontrados nos arquivos de entrada. Esta funcionalidade possibilitaria diminuir a quantidade de intervenções manuais sobre os dados;
- 3) desenvolver tratamento para possibilitar trabalhar com mais de uma rede de drenagem para uma mesma área de levantamento. Esta recomendação aumentaria a capacidade do protótipo para tratar diversas redes, usualmente encontradas numa mesma área de levantamento;
- 4) incluir rotinas de tratamentos de arquivos do tipo *shapefile* para possibilitar este tipo de entrada padrão. O desenvolvimento deste item possibilitaria que o protótipo operasse diretamente sobre este tipo de arquivo, usualmente encontrado em ambiente SIG;
- 5) desenvolver operadores para reconhecimento de padrões de distribuição espacial dos canais de redes de drenagem. O desenvolvimento deste item poderia conferir ao protótipo recursos de classificação de redes para emprego em outras ciências, como Geologia;

- 6) desenvolver operadores para o cálculo de áreas e perímetros de bacias e microbacias. O desenvolvimento deste item possibilitaria que estes atributos fossem calculados pelo protótipo, sem a necessidade de se recorrer a arquivo de dados externos;
- 7) desenvolver operadores para ordenamento de trechos de canais para os métodos Horton e Shreve, em complementação aos operadores implementados para o método de Strahler. O desenvolvimento deste item possibilitaria melhorar a funcionalidade sobre ordenamentos, contribuindo com a determinação do canal principal e auxiliando em rotinas de classificação toponímica dos canais de drenagem;
- 8) estender o tratamento temporal para uma sequência de levantamentos maiores que 3. A execução deste item possibilitaria a análise temporal de redes de drenagem num maior número de eventos;
- 9) criar o modelo de Entidade-Relacionamento para possibilitar a transformação de objetos do modelo de classes proposto para entidades relacionais de um banco de dados geoespacial, como componente para persistência destes objetos e aproveitamento da funcionalidade de tratamento espacial oferecida por estes tipos de bancos de dados.

Para facilitar e ampliar a aquisição de arquivos de dados de rede hidrográfica contendo valores de altitudes no mesmo arquivo, provenientes do *site* de Internet do IBGE, recomenda-se um estudo para realizar esta integração, de forma a obter num só arquivo, dados planialtimétricos, e um estudo de como corrigir as descontinuidades verificadas nas linhas de canais das redes hidrográficas.

Finalmente, sugere-se o desenvolvimento de pesquisa para comprovar a possibilidade de extensão do modelo proposto, na utilização por outras disciplinas e ciências, que tenham redes de drenagem como tema de seus estudos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Cadernos de Recursos Hídricos – Aproveitamento do Potencial Hidráulico para Geração de Energia**, 2007. Disponível em < http://www.ana.gov.br/AcoesAdministrativas/RelatorioGestao/_docs/Relatorio2006/portugues/index.html>. Acesso em: 10/01/2008.

BACIA HIDROGRÁFICA. In: AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Glossário de Termos Hidrográficos. Brasília: 2006. 74p. Disponível em <http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/arquivos/Glossario%20de%20Termo__15-09-06.pdf>. Acesso em: 21/03/2008.

BARRETO NETO, A. A.; SOUZA FILHO, C. R. Modelagem hidrológica utilizando lógica Fuzzy, SIG e dados de Sensoriamento Remoto. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13., 2007, Florianópolis. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Brasília: INPE, 2007, p. 3288

BEZERRA, E. **Princípios de análise e projeto de sistemas com UML**. Rio de Janeiro: Campus, 2002. 286 p.

BONDY, J.A.; MURTY, U.S.R. **Graph theory with applications**. Department of Combinatorics and Optimization, University of Waterloo, Ontario, Canada: North Holland, 1982. 264 p.

BOOCH, G.; RUMBAUGH, J.; JACOBSON, I. **UML: Guia do usuário**. Rio de Janeiro: Campus, 2006. 474 p.

BRASIL. Lei Federal Nº 9433, de 08 de janeiro de 2007. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 09 jan. 2007. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/blei19979433.pdf>>. Acesso em: 12/12/2007.

CHEN, P. P. S. **The entity-relationship model: towards a unified view of data**. New York: ACM Transactions on Database System, 1, 1976.

CROWLEY, R.G. **Digital Cartography**. New Jersey: Prentice Hall, 1992. 317 p.

DAVIS JUNIOR, C. A.; QUEIROZ, G. R. Algoritmos geométricos e relacionamentos topológicos. **Bancos de dados geográficos**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005. 83 p.

DEITEL, H. M.; DEITEL, P. J. **Java, como programar**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2003. 1386 p.

DELAZARI, L. S. **Extração automática de redes de drenagem a partir de modelos digitais de terrenos**. 155 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996.

DIESTEL, R. **Graph theory**. New York: Springer-Verlag, 2005. Edição eletrônica. Disponível em: <<http://www.math.uni-hamburg.de/home/diestel/books/graph.theory/GraphTheoryIII.counted.pdf>>. Acesso em: 20/10/2007.

ESRI - ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, INC. **Shapefile Technical Description**, July, 1998.

FLANAGAN, D. **Java: o guia essencial**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 1100 p.

FREELAN, S. **Developing a quasi-temporal GIS for archival map data**. Washington: Western Washington University, 2003. 71 p.

GEOTOOLS. **GeoTools users guide**: How to read a shapefile. Disponível em: <<http://docs.codehaus.org/display/GEOTDOC/04+How+to+Read+a+Shapefile>>. Acesso em: 23/10/2007.

GONTIJO JUNIOR, W. C.; KOIDE, S. Projeto de redes fluviométricas utilizando o método Sharp – Estudos de casos na bacia hidrográfica do Rio São Francisco. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2006, São Paulo. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. São Paulo: 2006. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/AcoesAdministrativas/CDOC/ProducaoAcademica/Wilde%20Cardoso%20Gontijo%20Junior/3_METODOS%20SHARP.pdf>. Acesso em 15/12/2007.

HOLTZ, A. C. T. **Estudo de Cenários para 2020 - Avaliação dos Cenários Prováveis para o PNRH - Síntese, Comentários e Recomendações**: versão Internet. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2005. 20p. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/pnrh_novo/docs/Cenarios_PNRH_2020.pdf>. Acesso em 13/01/2008.

HORSTMANN, C. **Conceitos de computação com o essencial de Java**. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 780 p.

HOTT, M. C.; FURTADO, A. L. S.; RIBEIRO, C. A. A. S. Determinação automática de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas no município de Campinas, SP. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13., 2007, Florianópolis. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Brasília: INPE, 2007, p. 3381-3388.

ICHOKU, C.; KARNIELI, A.; MEISELS, A.; CHOROWICZ, J. Detection of drainage channel networks on digital satellite images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 9, p. 1659–1678, jun 1996.

KEATES, J. S. **Cartographic design and production**, Longman, London, 1. ed., 1973, 240 p.

KÖSTERS, G.; PAGEL, B.; SIX, H. **GeoOOA: object-oriented analysis for geographical information systems**. Germany: University of Hagen, 1996. 9 p.

LANGRAN, G.; CHRISMAN, N. R. A framework for temporal geographic information. **Cartographica**, 25., 1988.

LANGRAN, G. **Time in geographic information system**. London: Taylor & Francis, 1992. 189 p.

LAURINI, R.; THOMPSON, D. **Fundamentals of spatial information systems**. The APIC series n. 37, London: Academic Press. 1998.

LIMA, W. de P. Análise física da bacia hidrográfica. In: **Introdução ao manejo de bacias hidrográficas**. São Paulo: USP - Departamento de Ciências Florestais, 1996. p. 55-76.

LISBOA FILHO, J.; IOCHPE, C. Um estudo sobre modelos conceituais de dados para projeto de bancos de dados geográficos. **Informática Pública**, v. 1, n.2, 1999. p. 67-90.

MAIDMENT, D. **ArcGIS Hydro Data Model**, Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin, 2001. Disponível em: <<http://www.crrw.utexas.edu/giswr/hydro/data/DataModel/archydromodel.pdf>>. Acesso em: 12/09/2008.

McALLISTER, M. **The computational geometry of hydrology data in geographic information systems**. Tese (Doctor of Philosophy Thesis) - The University of British Columbia, Columbia, 1999.

METSKER, S. J. **Padrões de projeto em Java**. Porto Alegre, Bookman, 2004, 407 p.

MITCHELL, T. **Web mapping illustrated: using open source GIS toolkits**. 1. ed. USA: O'Reilly, 2005. 367 p.

NAVATHE, S. B. Evolution for data modeling for databases. **Communications of the ACM**, v.35, n.9, p.112-123, 1992.

OBJECT MANAGEMENT GROUP, OMG **Unified Modeling Language Superstructure Specification**. 2005. 732 p.

PEREIRA, L. D. **Visualização de camadas de informação em ambiente internet**. Dissertação (Mestrado em Informática) – Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

PEREIRA NETO, A. **PostgreSQL: técnicas avançadas**. 2 ed. São Paulo: Érica, 2003. 284 p.

PEUQUET, D. J. Time in GIS and geographical databases. In: LONGLEY, P.; GOODCHILD, M.; MAGUIRE, D.; RHIND, D. (eds.) **Geographical information systems: principles and technical issues**. 2. ed. New York: J. Wiley & Sons, v. 2, 1999. p. 91-103.

PINTO, N. L. de S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia básica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1976. 279 p.

ROBINSON, A. H.; MORRISON, J. L.; MUEHRCKE, P. C.; KIMERLING, A. J.; GUPTILL, S. C. **Elements of cartography**. Wiley, 6th ed., 1995, 674 p.

ROCHA, L. S. S.; MOURA, A. C. M.; FREITAS, C. R.; DUTRA, L. V.; CARVALHO, O.; FREITAS, C. DA C.; GUIMARÃES, R. J.; AMARAL, R. S.; DRUMOND, S. Desenvolvimento de modelo de rede de drenagem como subsídio na análise espacial e distribuição da Esquistossomose no estado de Minas Gerais. In: **XXIII Congresso Brasileiro de Cartografia**. Rio de Janeiro, Brasil, 2007, p. 32-36. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/geoschisto/publicacoes/XXIII-CBC-Leonardo.pdf>> . Acesso em: 21/05/2008.

ROSIM, S.; PELLEGRINO, S. **Extração de rede de drenagem de imagem de radar usando modelos digitais de terreno**. GIS Brasil 99; 1999; 1; 1; 352; 358; GIS Brasil 99; Salvador.

SOUZA, J. D. de. **Modelo espaço-temporal em SIG para análise da qualidade da água em uma bacia hidrográfica**. 177 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

SPARX SYSTEMS. **Sparx systems enterprise architect user guide**, 2006.

TEIXEIRA, A. A.; PRADO, A.; SILVA, M.A.; SCHERER-WARREN, M.; HAUSCHILD, R. M.; SOUSA, F.; CAMPOS NETO, V. S. Topologia hídrica: uma proposta para gestão de recursos hídricos utilizando sistema de informações geográficas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., Florianópolis. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis: INPE, 2007, p. 3597-3605.

TONELLO, K. C. ; DIAS, H. C. T. ; SOUZA, A.L. ; RIBEIRO, C. A. A. S. ; LEITE, F. P. Morfometria da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães, MG. **Revista Árvore**, v. 5, p. 849-857, 2006.

VIEIRA, A. J. B. **Fenômenos terrestres como classes de objetos: um modelo espaço-temporal**. 113 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

WEIBEL, R.; HELLER, M. Digital terrain modelling. In: MAGUIRE, D. J.; GOODCHILD, M. F.; RHIND, D. W. **Geographical information systems: principles and applications**. New York: John Wiley and Sons, 1991.

WORBOYS, M. F. **A model for spatio-temporal information**. Proceedings: the 5th International Symposium on Spatial Data Handling, 2:602-611, 1992.

WORBOYS, M. F. **GIS: a computing perspective**. London: Taylor & Francis. 1995. 396 p.

YUAN, M.; MARK, D. M.; EGENHOFER, M.; PEUQUET, D. Extensions to geographic representation. In: McMASTER, R. B.; USERY, E. L. (eds). **A research agenda for geographic information science**, Florida: CRC Press, p. 129-156, 2004.

YUAN, M. **Temporal GIS and spatio-temporal modeling**. Department of Geography, The University of Oklahoma, 1996. Disponível em <http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/yuan_may/may.html>. Acesso em 29/08/2006.

ZEILHOFER, P.; ARRAES NETO, P.; FONSECA, D. C.; LOPES, R. R. F. Um componente de arquitetura orientada a objetos para subsidiar a concessão de outorga de RH em um ambiente SIG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. INPE, 2007. p. 3615-3622.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 - ALGUNS TRECHOS DE OPERADORES DESENVOLVIDOS PARA O PROTÓTIPO.....	135
APÊNDICE 2 - PROCESSO DE EXTRAÇÃO DE REDES DE DRENAGEM.....	140
APÊNDICE 3 - CONVERSÃO ENTRE FORMATOS DE ARQUIVOS DE DADOS...	163

APÊNDICE 1 – ALGUNS TRECHOS DE OPERADORES DESENVOLVIDOS PARA O PROTÓTIPO

Este apêndice reúne alguns exemplos de operadores ou trechos de operadores de classes de objetos e fazem parte do protótipo de software desenvolvido em linguagem Java.

a) Trecho da declaração da classe *Ponto*:

```
public class Ponto {

    private Double x;
    private Double y;
    private Double z;
    private Boolean tipoTopografico;

    public Ponto(Double x, Double y, Double z, Boolean tipo) {
        this.x = x;
        this.y = y;
        this.z = z;
        this.tipoTopografico = tipo;
    }

    @SuppressWarnings("empty-statement")
    public Ponto() {
        ;
    }

    :::::
}
```

b) Trecho da declaração da classe *PontoTopografico*, como subclasse da classe *Ponto* e definindo três construtores:

```
public class PontoTopografico extends Ponto implements Cloneable {

    private Integer id;

    public PontoTopografico(Double x, Double y, Double z) {
        super(x, y, z, true); // Atributo tipoTopografico na classe Ponto é sempre true
        this.setId(ContadorID.addCt(ContadorID.POINT_ID));
    }

    public PontoTopografico(Integer id, Double x, Double y, Double z) {
        super(x, y, z, true);
        ContadorID.addCt(ContadorID.POINT_ID);
        this.setId(id);
    }

    public PontoTopografico() {
        this.setId(ContadorID.addCt(ContadorID.POINT_ID));
    }

    :::::
}
```


c) Verificação se os REMs de objetos da classe Polilinha se interceptam:

Este método retorna **true** se o REM do objeto da polilinha atual intercepta o REM do objeto da polilinha *polPara*. Este operador foi adaptado de algoritmo estudado (DAVIS JUNIOR; QUEIROZ, 2005, p. 49).

```
public boolean REMsInterceptam(Polilinha polPara) {
    PontoTopografico a, b, c, d;
    PontoTopografico p, q, p1, q1;

    a = new PontoTopografico(); b = new PontoTopografico();
    c = new PontoTopografico(); d = new PontoTopografico();
    p = new PontoTopografico(); q = new PontoTopografico();
    p1 = new PontoTopografico(); q1 = new PontoTopografico();

    a.setX( this.getRem().getXMin() );
    a.setY( this.getRem().getYMin() );
    b.setX( this.getRem().getXMax() );
    b.setY( this.getRem().getYMax() );
    c.setX( polPara.getRem().getXMin() );
    c.setY( polPara.getRem().getYMin() );
    d.setX( polPara.getRem().getXMax() );
    d.setY( polPara.getRem().getYMax() );

    p.setX( Math.min(a.getX(), b.getX()) );
    p.setY( Math.min(a.getY(), b.getY()) );
    q.setX( Math.max(a.getX(), b.getX()) );
    q.setY( Math.max(a.getY(), b.getY()) );

    p1.setX( Math.min(c.getX(), d.getX()) );
    p1.setY( Math.min(c.getY(), d.getY()) );
    q1.setX( Math.max(c.getX(), d.getX()) );
    q1.setY( Math.max(c.getY(), d.getY()) );

    return ( (q.getX() >= p1.getX()) && (q1.getX() >= p.getX()) &&
            (q.getY() >= p1.getY()) && (q1.getY() >= p.getY()) );
}
```

d) Obtenção dos diversos trechos de canais a partir de um nó inicial *nodeFrom*:

O método *getNextTrecho()* percorre uma lista de trechos de canais a partir de um nó inicial *nodeFrom*. Este método explora a possibilidade de recursão da linguagem Java e o fato de que um trecho de canal é um item ordenado no sentido do *nó-de* para o *nó-para*. Este exemplo do uso de recursão utiliza o método *getNextTrecho()* da classe *Canal*, para se obter os diversos trechos do canal. Enquanto o método *getTrecho()* consegue obter um próximo trecho de canal, este é adicionado a lista de trechos do canal e o próprio método *getNextTrecho()* é novamente chamado, passando-se agora o nó seguinte do trecho como o nó inicial de busca do próximo trecho. O caso básico é reconhecido quando um próximo trecho de canal não é mais obtido (*trecho == null*).

```

.....
public void getNextTrecho(No nodeFrom, List<TrechoDeCanal> trechos) {
    TrechoDeCanal trecho = new TrechoDeCanal();
    trecho = getTrecho(nodeFrom, trechos);
    if (trecho == null) {
        return;
    }
    this.addTrecho(trecho);
    this.setComprimento(this.getComprimento() + trecho.getComprimento());
    this.getNextTrecho(trecho.getNoPara(), trechos);
}

private TrechoDeCanal getTrecho(No nodeFrom, List<TrechoDeCanal> trechos) {
    for (TrechoDeCanal trecho: trechos) {
        if (trecho.getNoDe().equals(nodeFrom)) {
            return trecho;
        }
    }
    return null;
}

.....

```

e) Trechos para leitura e gravação de arquivos sequenciais utilizados no protótipo:

```

// LEITURA
String inputFile = "C:\\Drenagem\\Dados\\r01.txt";
FileInputStream fis = new FileInputStream(inputFile);
BufferedReader br = new BufferedReader(new InputStreamReader(fis));
String rec = br.readLine();

while (rec != null) {
    .....
    rec = br.readLine();
}

.....

//GRAVAÇÃO
String outputFile = "C:\\Drenagem\\Dados\\Saida.txt";
pw = new PrintWriter(new FileOutputStream(outputfile, false), false);
pw.println("Polilinha");
pw.close();

```

f) Ordenamento de trechos de canais pelo método de Strahler:

O ordenamento da rede de drenagem pelo método Strahler utiliza dois operadores da classe *RedeDeDrenagem*. O primeiro a ser invocado é o *inicializaTrechosPrimeiraOrdem()* que determina os trechos de primeira ordem a partir dos nós nascentes. Em seguida, o operador *ordenaTrechosSTRAHLER()* é chamado, para o ordenamento dos demais trechos da rede de drenagem.

```

private void inicializaTrechosPrimeiraOrdem(TipoOrdenamento tipoOrdem) {

    List<Ordenamento> ords = new ArrayList<Ordenamento>();

    Nos nos = new Nos();
    nos.addNos(this.getAllNodes());
    nos = nos.getNosPorTipo(TipoNo.NASCENTE);

    List<TrechoDeCanal> trechos = this.getTrechos();

    // Determine os trechos de 1a. ordem (independe do método de ordenamento)
    for (int iNo=0; iNo<nos.size();iNo++) {

        No nodeDe = nos.get(iNo);

        for (TrechoDeCanal t: trechos) {
            No noDe = t.getNoDe();
            if (noDe.getId() == nodeDe.getId()) {
                t.setOrdemDoTrechoByTipo(tipoOrdem, 1);
            }
        }
    }
}

private void ordenaTrechosSTRAHLER() {

    Nos nos = new Nos();
    nos.addNos(this.getAllNodes());
    nos = nos.getNosPorTipo(TipoNo.CONFLUENTE);

    Boolean ficouPendente = true;
    while (ficouPendente) {

        ficouPendente = false;
        for (int iNo=0; iNo<nos.size();iNo++) {

            No nodePara = nos.get(iNo);
            List<Integer> ordensConfluencia = new ArrayList<Integer>();
            List<TrechoDeCanal> trechosConfluentes = this.getTrechosMontanteByNo(nodePara);

            for (TrechoDeCanal trecho: trechosConfluentes) {
                Integer ordem = trecho.getOrdemDoTrechoByTipo(TipoOrdenamento.STRAHLER);
                if (ordem == 0) {
                    ficouPendente = true;
                    break; //Abandone esta confluencia
                }
                ordensConfluencia.add(ordem);
            }

            if ((ordensConfluencia.size() == trechosConfluentes.size()) &&
                (ordensConfluencia.size() > 1)) {
                Boolean difere = true;
                Integer ordemMax = ordensConfluencia.get(0);
                for (int i=1; i<ordensConfluencia.size();i++) {
                    difere = (ordensConfluencia.get(i) != ordensConfluencia.get(i-1));
                    ordemMax = Math.max(ordemMax, ordensConfluencia.get(i));
                }
                if (!difere) ordemMax++;

                TrechoDeCanal trechoCurr = new TrechoDeCanal();
                trechoCurr = this.getTrechoJusanteByNo(nodePara);
                if (trechoCurr != null) {
                    Integer k = this.trechos.lastIndexOf(trechoCurr);
                    this.trechos.get(k).setOrdemDoTrechoByTipo(TipoOrdenamento.STRAHLER, ordemMax);
                }
            }
        } // for
    } // while
    return;
}

```

g) Classe Recobrimento e o operador temporal utilizado:

Este trecho do código apresenta parte da definição da classe Recobrimento, na qual o operador temporal *varDensidadeDrenagem()* foi utilizado.

```
package drenagem;

import java.util.ArrayList;
import java.util.List;

public class Recobrimento {

    public Recobrimento() {

    }

    public Recobrimento(Integer id) {
        this.setId(id);
        this.setAreasLevantamento(new ArrayList<AreaLevantamento>());
        this.setRem(new REM());
    }

    private Integer id;
    private REM rem;
    private List<AreaLevantamento> areasLevantamento;

    //::::::::::
    //::::::::::

    public List<AreaLevantamento> getAreasLevantamento() {
        return areasLevantamento;
    }

    public void setAreasLevantamento(List<AreaLevantamento> areasLevantamento) {
        this.areasLevantamento = areasLevantamento;
    }

    /*
     * varDensidadeDrenagem: determina as variações de densidade de uma
     * rede de drenagem para diferentes tempos de areas de levantamento
     */
    public Float[] varDensidadeDrenagem() {

        Float varDens[] = new Float[this.areasLevantamento.size()-1];
        Float dens[] = new Float[this.areasLevantamento.size()];

        // Para cada epoca de areas de levantamento de um mesmo recobrimento
        // obtenha a rede de drenagem (assumindo aqui que existe uma só rede
        // por area de levantamento), calcule a densidade de drenagem e
        // armazene no vetor de densidades obtidas

        for (int i=0;i<this.areasLevantamento.size();i++) {
            RedeDeDrenagem rede = this.areasLevantamento.get(i).getRedes().get(0);
            rede.setDensidadeDrenagem(rede.calculaDensidadeDrenagem());
            dens[i] = rede.getDensidadeDrenagem();
        }

        // Calcule a variação da densidade de drenagem para todos os instantes
        for (int i=1;i<this.areasLevantamento.size();i++) {
            varDens[i-1] = dens[i] / dens[i-1];
        }

        return varDens;
    }

}
```

APÊNDICE 2 – PROCESSO DE EXTRAÇÃO DE REDES DE DRENAGEM

Este apêndice apresenta o processo de extração de rede de drenagem utilizado, quando os dados existentes provinham de uma grade de pontos altimétricos, utilizando-se as extensões do software ArcGIS®.

Na realização deste procedimento, o termo "menu de *pop-up*" se refere ao menu apresentado ao se clicar com o botão direito do mouse sobre um item da interface gráfica do software em questão. Todos os softwares e extensões mencionados neste apêndice, salvo indicação ao contrário, são de propriedade da ESRI. Todas as figuras deste apêndice foram obtidas por captura das telas do ArcMap®.

1) Preparação do ambiente

O ArcMap® é um software integrante da família ArcGIS® da ESRI e possui algumas extensões que oferecem facilidades de análise. Estas facilidades estão classificadas e funcionalmente agrupadas na interface. Entre estas extensões, duas serão utilizadas para o propósito deste exercício: 3D Analyst e Spatial Analyst. Para que estas extensões possam ser utilizadas pela primeira vez numa instalação nova, a partir do ArcMap®, é necessário habilitá-las no menu "Tools/Extensions" (fig.66).

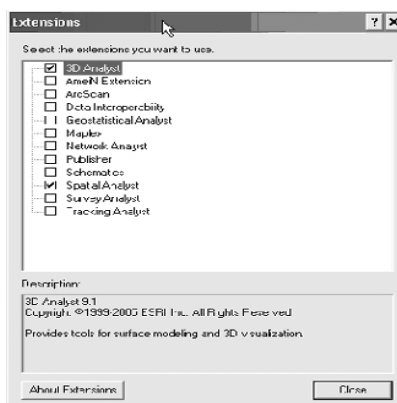


FIGURA 66 - CAIXA DE SELEÇÃO DE EXTENSÕES DO ArcGIS®
FONTE: O autor (2008)

Estas ferramentas podem ser utilizadas a partir da janela de diálogo do ArcMap® denominada ArcToolbox (fig. 67).

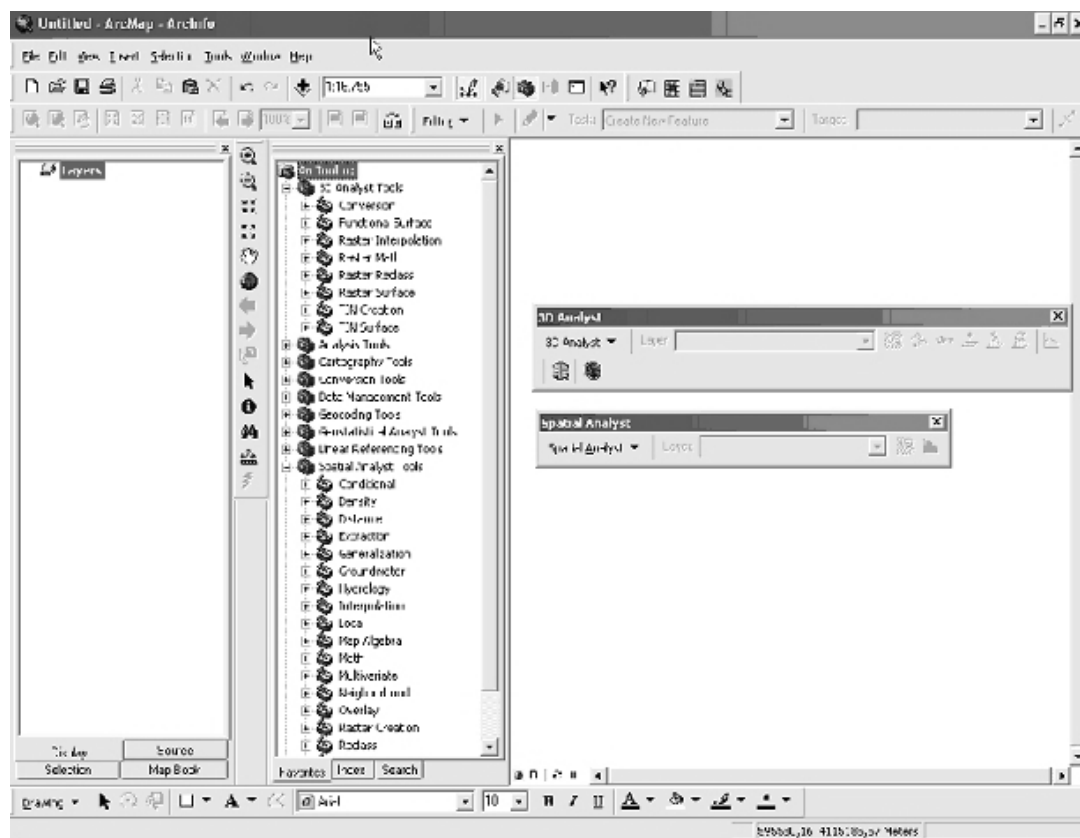


FIGURA 67 - MENU ARCTOOLBOX DO ArcMAP®
 FONTE: O autor (2008)

2) Dados para o processo

Para este processo, utilizou-se uma grade de 2501 pontos proveniente da pasta “exercícios 4” de um dos tutoriais do ArcGIS®. Estes pontos estão no arquivo chamado "vipoints" no formato *coverage*. Este formato de arquivo permite armazenar feições de uma mesma natureza, por exemplo, pontos ou polígonos e que apresentem um mesmo conjunto de atributos não-espaciais. Adiciona-se este arquivo no ArcMap® a partir do ícone "Add data" localizado na barra principal de ícones. Esta função abre uma janela de diálogo para a localização e seleção do arquivo. Uma vez lido este arquivo, o ArcMap® o incorpora na lista de *layers* atuais localizado no painel da extrema esquerda da interface e o apresenta numa visualização padrão dos pontos lidos (fig. 68).

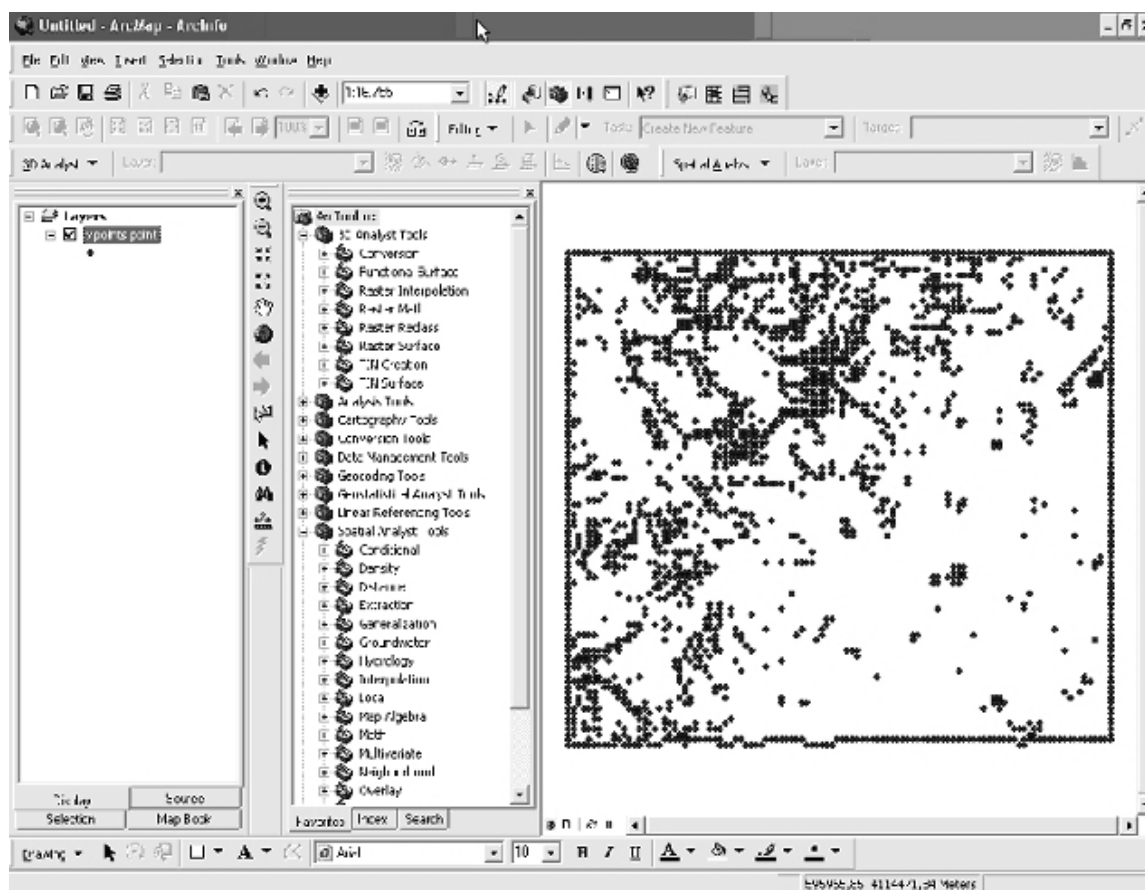


FIGURA 68 - LAYER DA GRADE DE PONTOS PARA O PROCESSO
 FONTE: O autor (2008)

Visualiza-se a tabela de atributos da *layer* a partir do menu de *pop-up* disparado sobre a *layer* da coluna de *layers*, selecionando-se "Open Attributes Table". Parte da tabela de atributos do arquivo (fig. 69) é apresentada, onde duas colunas se destacam: FID e SPOT. A primeira armazena a identificação de cada ponto e a coluna SPOT suas respectivas altitudes.

ID	Stage	SPOT	AREA	PERIMETER	VIPONTS4	VIPONTS-ID	VIPONTS	VIPONTS_I
1	Pont	185,12	0	0	0	1	1	1
2	Pont	183,12	0	0	0	2	2	2
3	Pont	199,034	0	0	0	3	3	3
4	Pont	201,163	0	0	0	4	4	4
5	Pont	201,163	0	0	0	5	5	5
6	Pont	202,987	0	0	0	6	6	6
7	Pont	205,405	0	0	0	7	7	7
8	Pont	207,874	0	0	0	8	8	8
9	Pont	210,007	0	0	0	9	9	9
10	Pont	213,055	0	0	0	10	10	10
11	Pont	216,103	0	0	0	11	11	11
12	Pont	219,151	0	0	0	12	12	12
13	Pont	222,199	0	0	0	13	13	13
14	Pont	225,247	0	0	0	14	14	14
15	Pont	228,295	0	0	0	15	15	15
16	Pont	231,343	0	0	0	16	16	16
17	Pont	234,391	0	0	0	17	17	17
18	Pont	237,439	0	0	0	18	18	18

FIGURA 69 - TABELA DE ATRIBUTOS DOS PONTOS DO MODELO
 FONTE: O autor (2008)

A distribuição de frequência dos dados de altitudes e alguns valores de estatística como número da amostra, valores mínimos e máximos, soma, média e desvio-padrão, são apresentados ao se chamar o menu de *pop-up* (fig. 70) e visualizados segundo a figura 71.

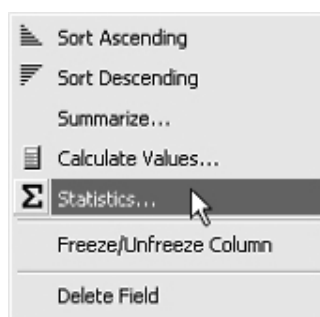


FIGURA 70 - MENU DE INVOCAÇÃO DE FUNÇÕES GERAIS SOBRE DADOS
 FONTE: O autor (2008)

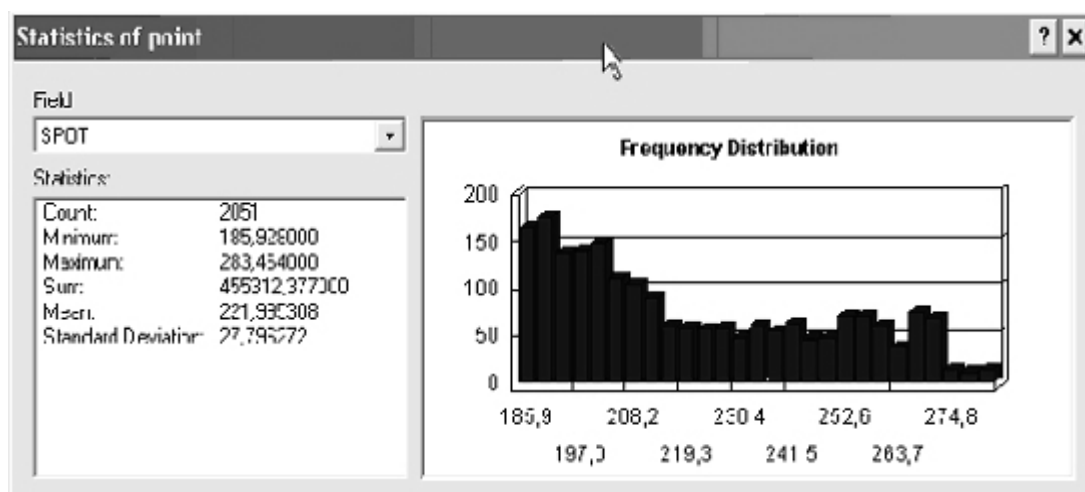


FIGURA 71 - JANELA DOS RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS DADOS
 FONTE: O autor (2008)

De posse dessa distribuição, é possível inferir que a grade de pontos do terreno pode ser grosseiramente separada para este caso em três patamares de altitudes dos pontos: abaixo de 210,0m (inferior), maior que 210,0m e menor que 270,0m (médio) e acima de 270,0m (superior). Observa-se pela distribuição de frequência deste exemplo, uma predominância de pontos de altitudes menores e poucos pontos com altitudes maiores. Este sentimento inicial a respeito dos dados é simples de obtê-lo, e tem um custo de aquisição muito pequeno, uma vez que até aqui não foi necessário a execução intensiva de algoritmos de geração de malha superficial para visualização. Outro fator importante, é que a determinação de redes de drenagem, por sua própria natureza, melhor se presta em terrenos não muito planos.

Complementarmente, o ArcMap® também oferece uma janela de diálogo obtida pela escolha do item "Propriedades" no menu de "pop-up" sobre a *layer* de pontos. Esta seleção apresenta as propriedades da *layer*, organizadas numa série de guias ou abas. Entre elas, pode-se visualizar o sistema de projeção e o envelope de coordenadas da massa de dados (fig. 72).

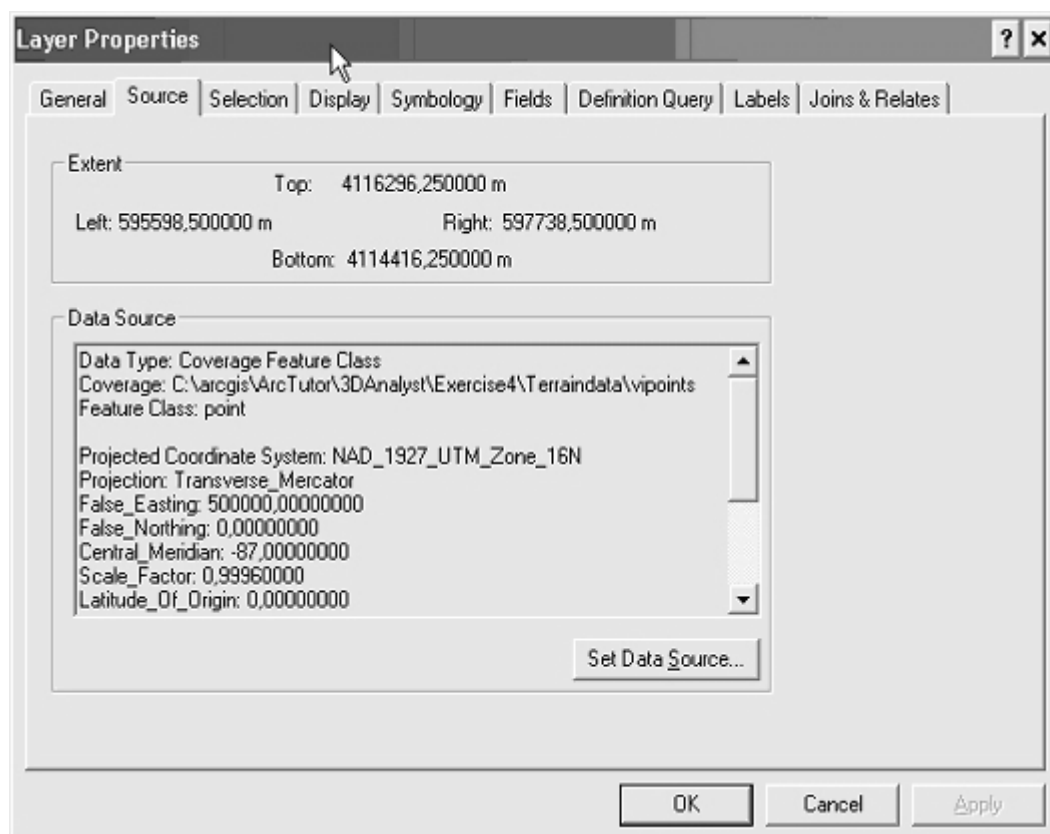


FIGURA 72 - VISUALIZAÇÃO DE PARTE DAS PROPRIEDADES DA LAYER DE PONTOS
FONTE: O autor (2008)

3) Passos para a determinação da rede de drenagem

Para a geração do MDT (Modelo Digital do Terreno) a partir da grade de pontos, utiliza-se uma rede irregular de triângulos (TIN).

3.1) Criação da TIN

A função "Create TIN" é disparada pelo menu "3D Analyst Tools / TIN Creation" do ArcToolbox. Ela prepara uma estrutura de arquivos para receber a rede triangulada gerada mais tarde (fig. 73). Esta função solicita dois parâmetros pela janela de diálogo: o arquivo de saída para a TIN e a referência espacial que será utilizada na geração.

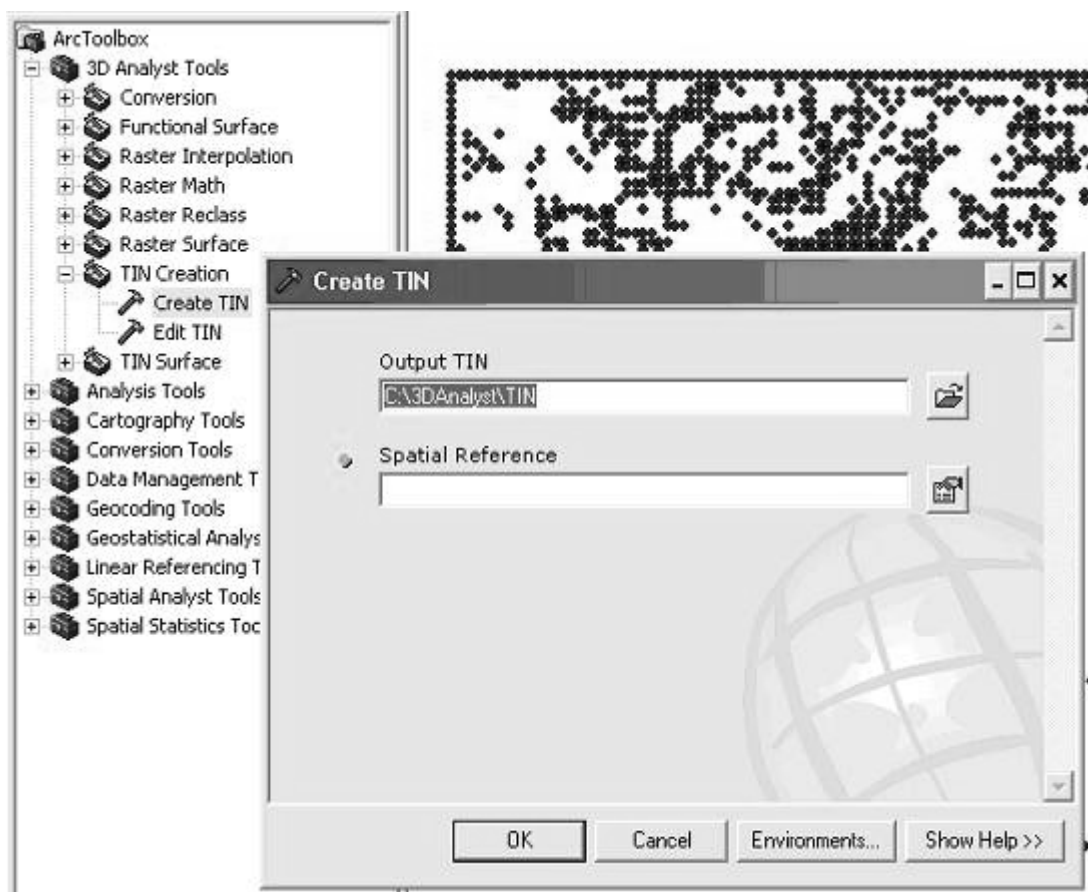


FIGURA 73 - CRIAÇÃO DA TIN INICIAL VAZIA
FONTE: O autor (2008)

Para a seleção da referência espacial, pressiona-se o botão correspondente. A caixa de diálogo da figura 74 é apresentada.

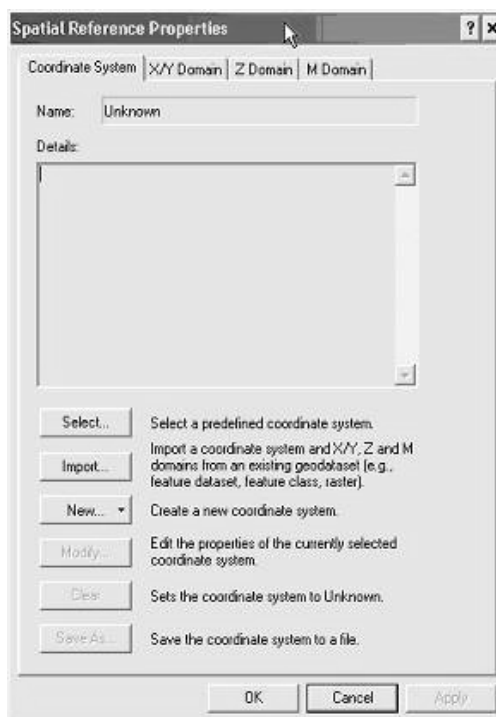


FIGURA 74 - PROPRIEDADE DA REFERÊNCIA ESPACIAL
FONTE: O autor (2008)

Clica-se em "Select..." e procede-se com a seleção do sistema de coordenadas mediante escolha das pastas disponíveis na janela de diálogo (fig. 75).

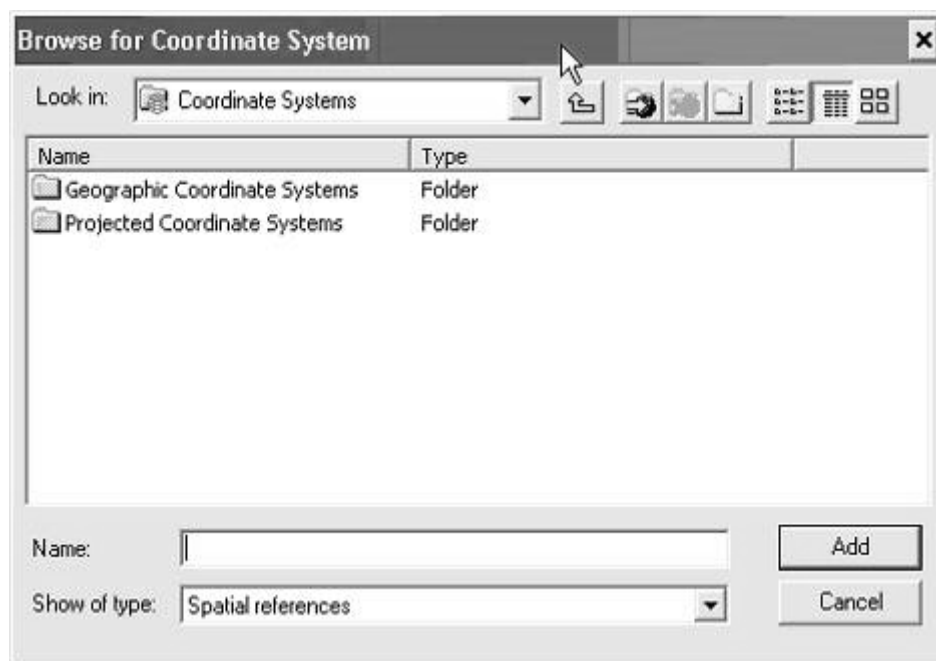


FIGURA 75 - PESQUISA PELO SISTEMA DE COORDENADAS
FONTE: O autor (2008)

Para o presente caso, seleciona-se a pasta “Projected Coordinate Systems” e em seguida a pasta “Utm” (fig. 76).

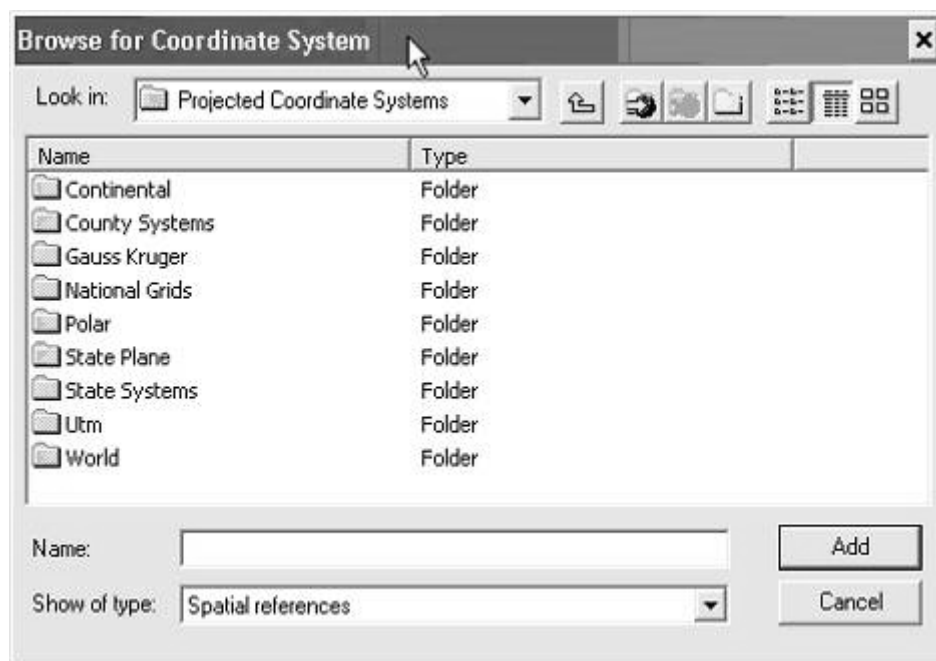


FIGURA 76 - SISTEMAS DE COORDENADAS
FONTE: O autor (2008)

Para os dados do exemplo, seleciona-se o meridiano 16N, conforme visualizado nas figuras 77 e 79.

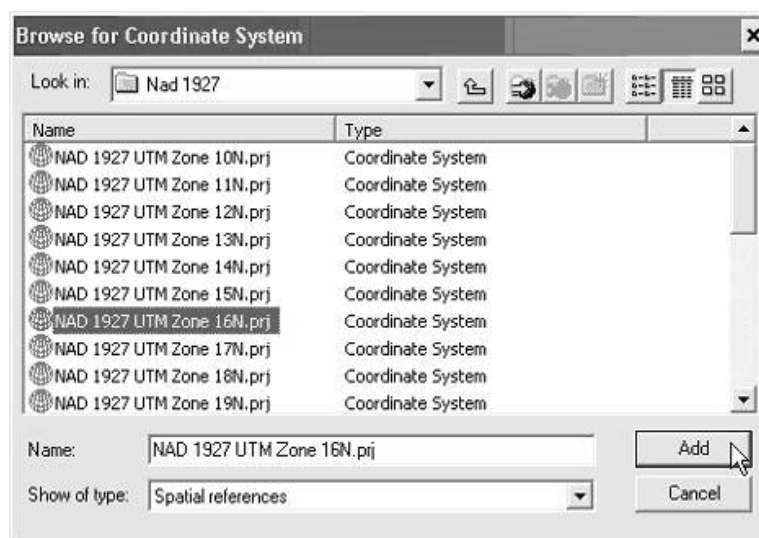


FIGURA 77 - SELEÇÃO DO MERIDIANO
FONTE: O autor (2008)

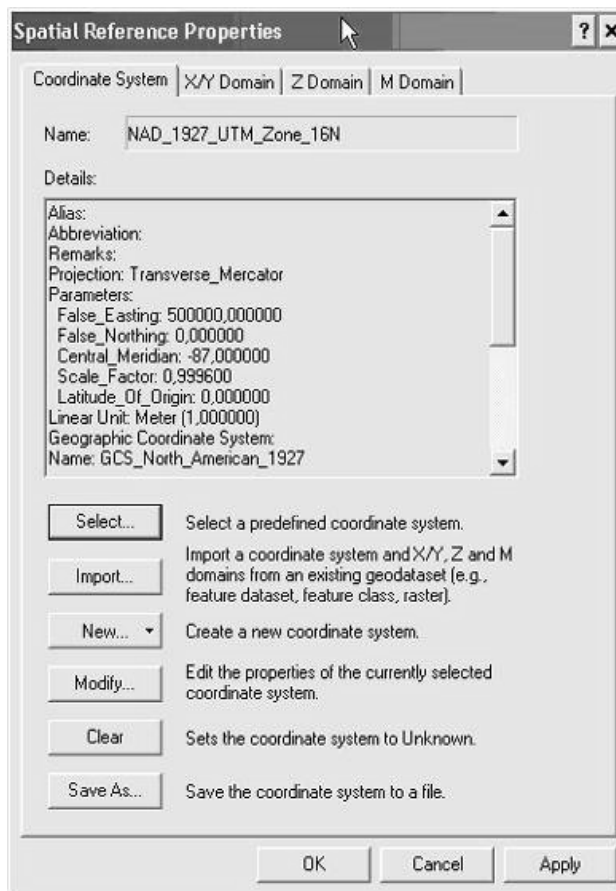


FIGURA 78 - APRESENTAÇÃO DO SISTEMA SELECIONADO
 FONTE: O autor (2008)

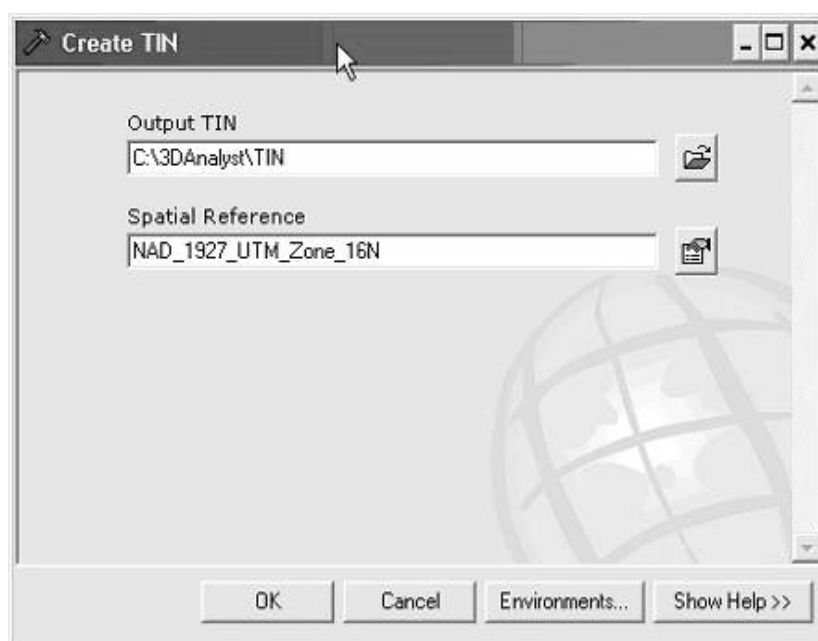


FIGURA 79 - RETORNO A CAIXA DE DIÁLOGO INICIAL
 FONTE: O autor (2008)

Verifica-se também que uma nova *layer* com o nome fornecido, no caso, TIN, é criada na coluna de *layers*.

3.2) Edição da TIN

Neste passo, seleciona-se a grade de pontos que será utilizada para a efetiva geração da TIN. Para isso, fornece-se a TIN inicial criada no passo anterior, que será utilizada para a geração e qual o arquivo de feições e atributo que será utilizado para as altitudes dos pontos (fig. 80).

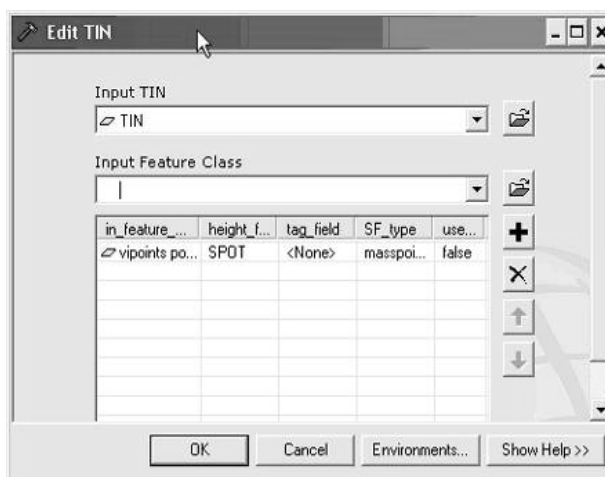


FIGURA 80 - PARÂMETROS PARA A EDIÇÃO DA TIN
FONTE: O autor (2008)

Fecha-se a janela de diálogo e observa-se que sob a *layer* de pontos a rede de triângulos é visualizada (fig. 81).

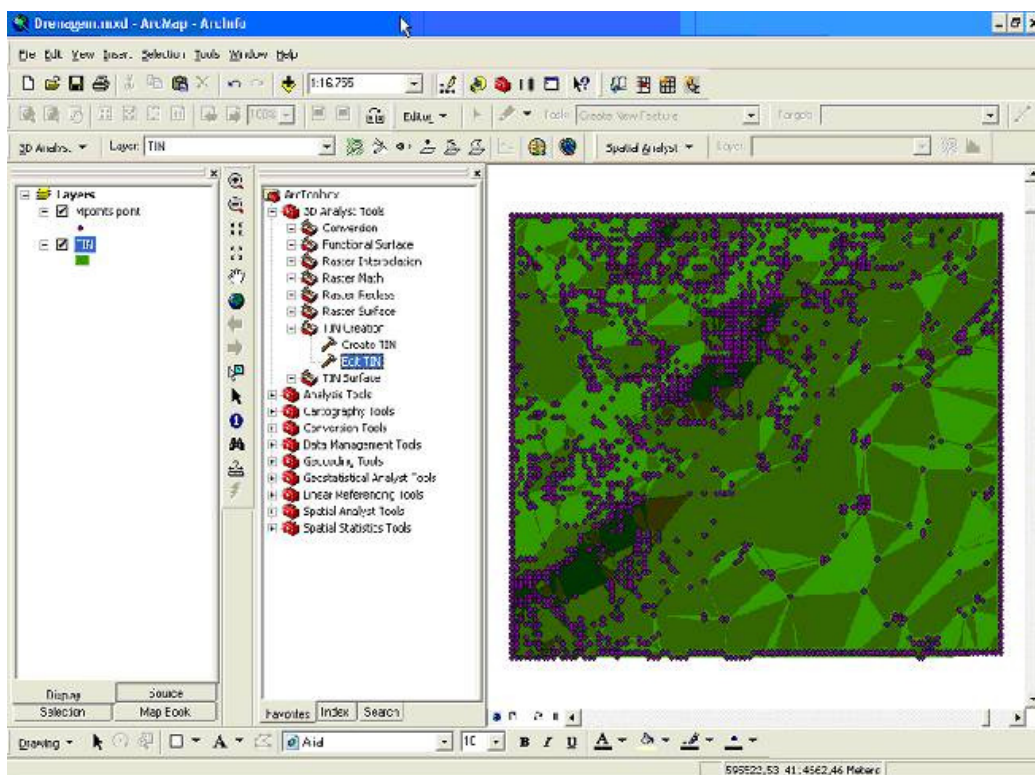


FIGURA 81 - VISUALIZAÇÃO DA TIN PRODUZIDA
FONTE: O autor (2008)

Opcionalmente é possível estratificar o conjunto de altitudes em classes discretas obtendo-se diferente visualização (fig. 82).

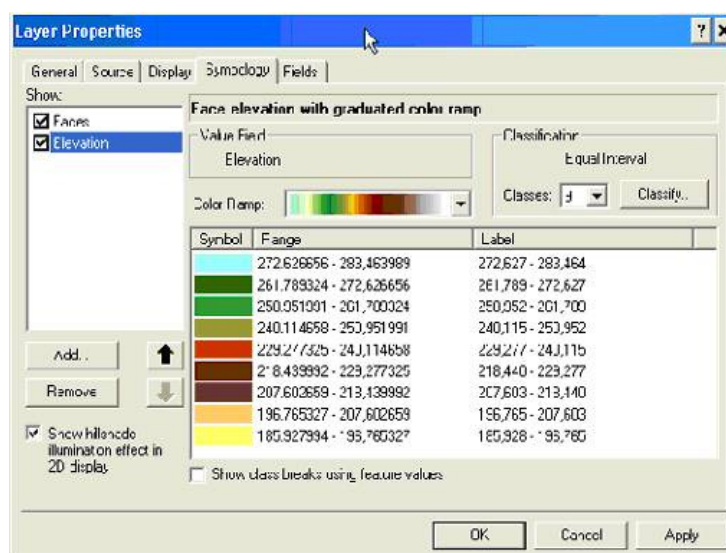


FIGURA 82 - RAMPA DE CORES PARA OS VALORES DE ALTITUDES
FONTE: O autor (2008)

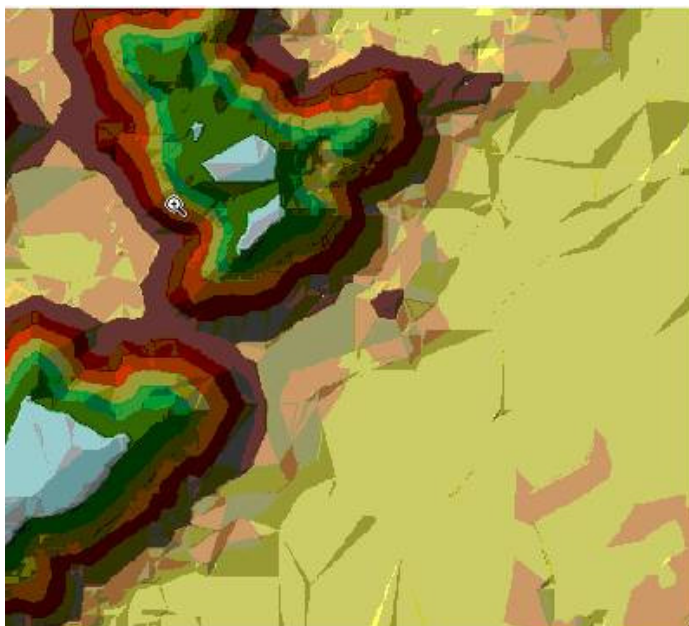


FIGURA 83 - LAYER APÓS APLICAÇÃO DA CLASSE DE CORES
FONTE: O autor (2008)

3.3) Preenchimento de depressões

Neste passo determina-se o preenchimento de depressões. Este procedimento é necessário como pré-requisito para a execução dos passos seguintes. O procedimento consiste em determinar as regiões que não drenam adiante (*sinks*). Para tal, o procedimento emprega um algoritmo para a determinação da direção de fluxo em cada célula, levando-se em conta a condição de uma célula não apontar para a outra de forma indeterminada (em *loop*). O custo da operação será diretamente proporcional ao tamanho da grade de pontos.

Dois tipos de "preenchimento" podem ser encontrados conforme as figuras 84 e 85, e ambos serão tratados neste passo. Para a realização do preenchimento, a TIN deverá ser convertida para uma imagem raster, a partir da qual o preenchimento propriamente dito será realizado. Esta conversão em matriz regular de pixels é necessária pois, o método de determinação de fluxo que se seguirá, utiliza os valor de altitude de cada célula comparado com os valores de altitudes das células vizinhas, conforme adiante detalhado. Este preenchimento é uma preparação para aquele método.

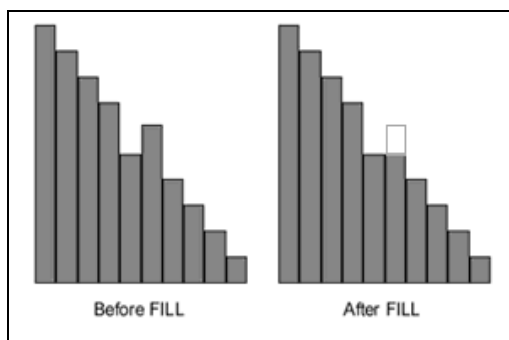


FIGURA 84 - AJUSTE DE DEPRESSÕES POR CORTES (SUPRESSÕES) ADJACENTES
FONTE: O autor (2008)

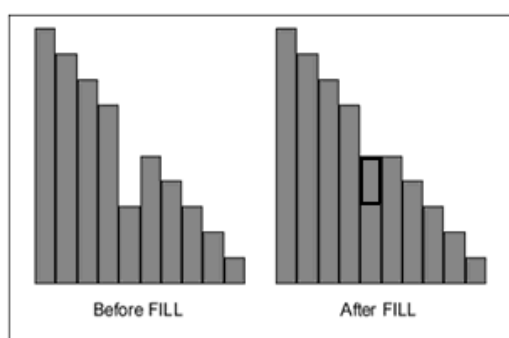


FIGURA 85 - AJUSTE DE DEPRESSÕES POR PREENCHIMENTOS ADJACENTES
FONTE: O autor (2008)

Seleciona-se a opção "TIN to Raster" a partir da ferramenta "3D Analyst Tools/Conversion" no menu do ArcToolbox, cujo diálogo é apresentado na figura 86.

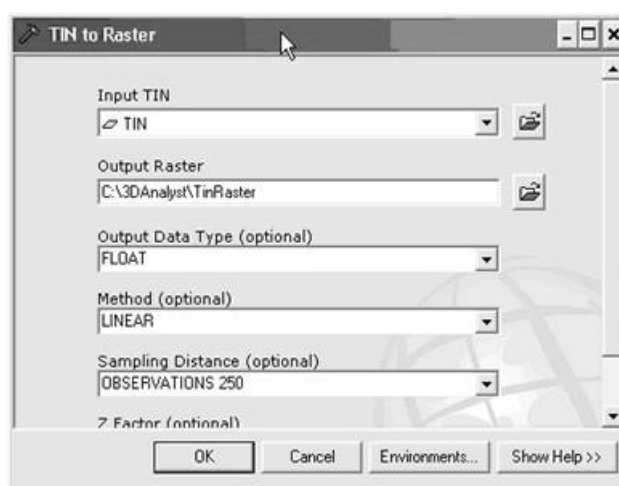


FIGURA 86 - JANELA DE DIÁLOGO PARA A GERAÇÃO DA IMAGEM RASTER
FONTE: O autor (2008)

Como resultado, uma nova *layer* é gerada com a imagem raster criada (fig. 87).

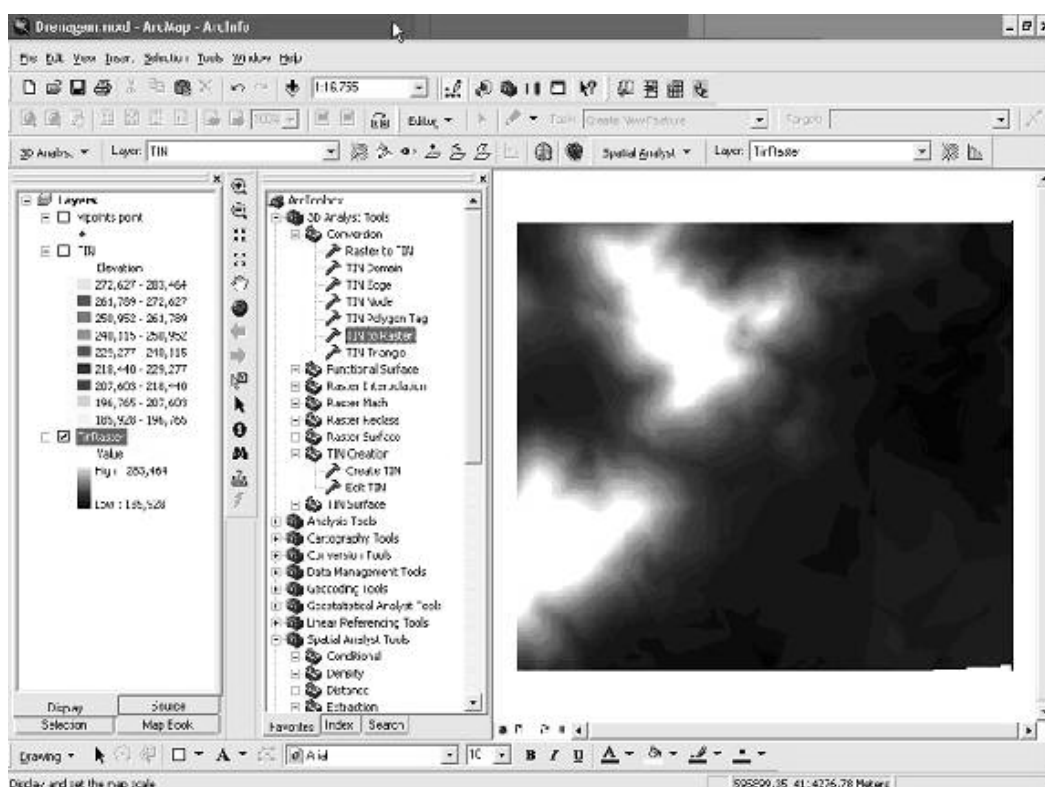


FIGURA 87 - IMAGEM RASTER CRIADA A PARTIR DA TIN
FONTE: O autor (2008)

Em seguida, realiza-se o preenchimento por meio do menu do "Spatial Analyst Tool", ferramenta "Hydrology / Fill" do ArcToolbox. A função invoca a janela de diálogo da figura 88.

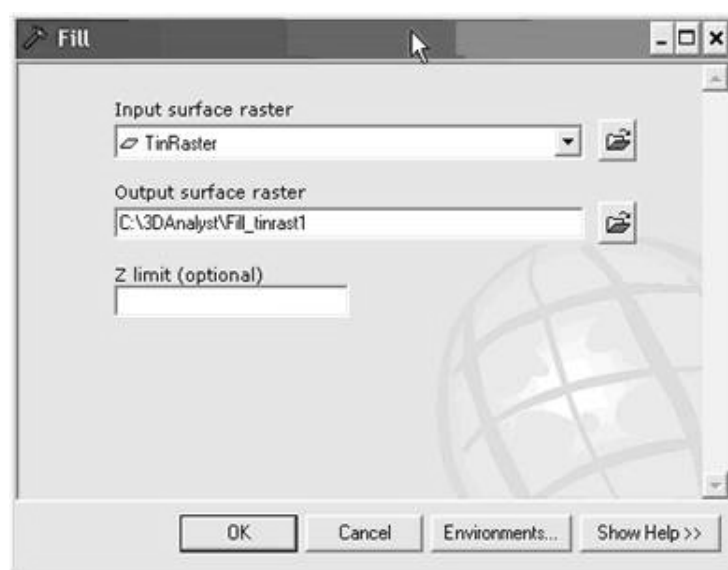


FIGURA 88 - DIÁLOGO PARA PREENCHIMENTO DAS DEPRESSÕES
FONTE: O autor (2008)

3.4) Determinação do sentido do fluxo

O determinação da rede de drenagem é ditada pelo sentido do fluxo. Este sentido é determinado tomando-se um bloco de nove células (uma célula central e oito células vizinhas). Cada sentido em relação à célula central recebe um valor pré-determinado (fig. 89). Este valor não tem nenhuma relação com qualquer outro valor físico das células. O sentido do fluxo descendente é determinado pela análise de cada célula central em relação as suas vizinhas. Por comparação dos valores das altitudes entre a célula central e suas vizinhas, a célula central recebe o valor do sentido da célula vizinha mais íngreme do fluxo descendente.










			32	64	128
			16		1
			8	4	2

FIGURA 89 - VALORES DOS SENTIDOS EM RELAÇÃO A CÉLULA CENTRAL
FONTE: O autor (2008)

Assim, por exemplo, se o sentido mais íngreme aponta para a célula ao norte, a célula em questão recebe o valor 64 (fig. 90) e o procedimento é repetido com a célula ao norte como sendo a nova célula central.


					
				64	

FIGURA 90 - VALOR AFIXADO APÓS ANÁLISE
FONTE: O autor (2008)

Para este procedimento, a função "Flow Direction" é chamada passando-se os parâmetros abaixo (fig. 91) e produzindo-se o resultado segundo a figura 92.

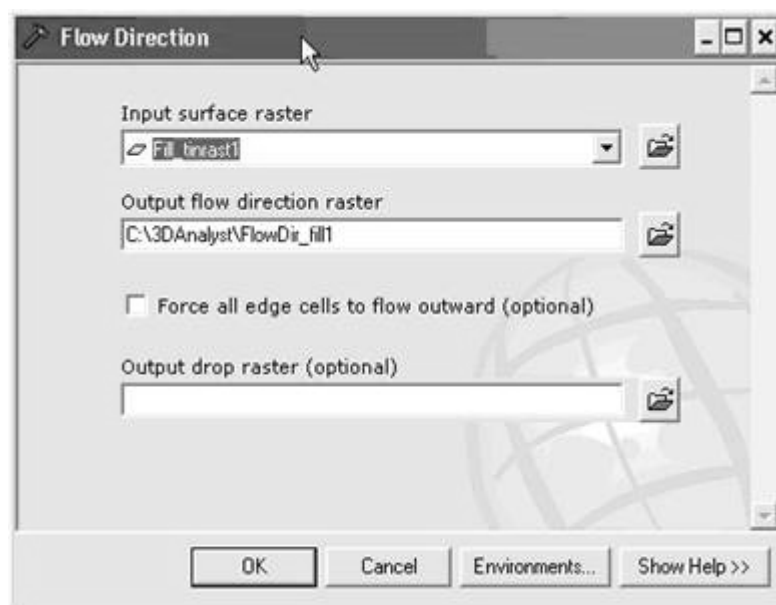


FIGURA 91 - JANELA DE DIÁLOGO "FLOW DIRECTION"
FONTE: O autor (2008)

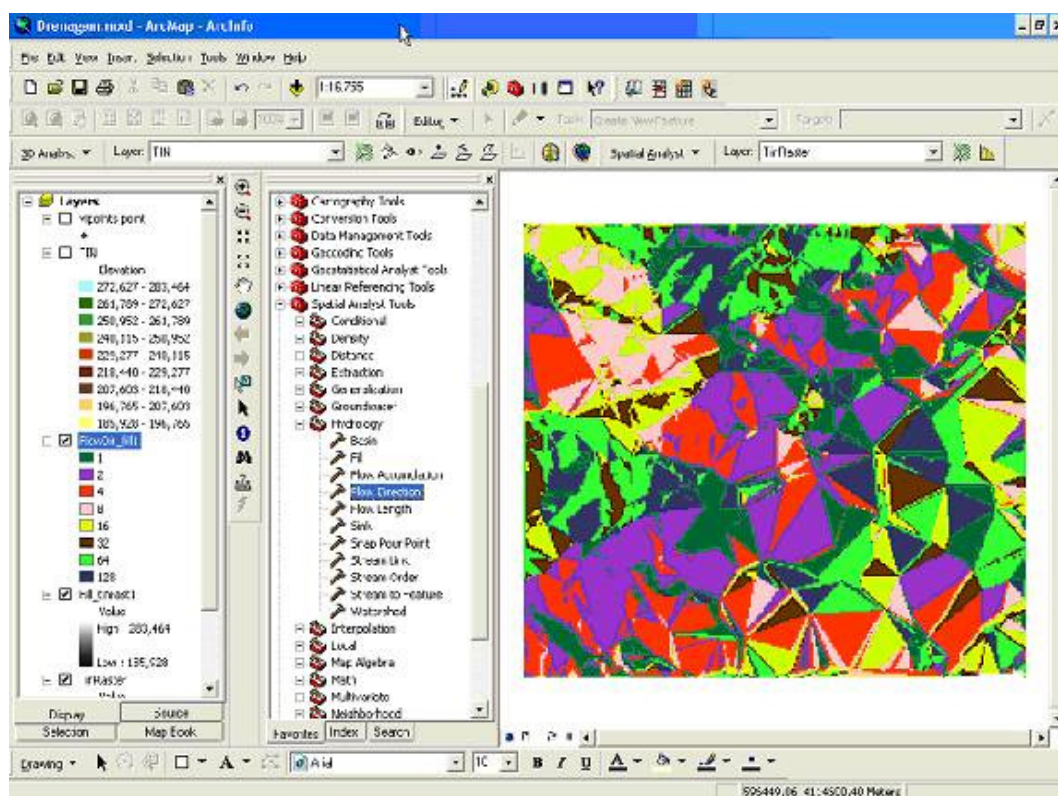


FIGURA 92 - LAYER DOS SENTIDOS DE FLUXO DETERMINADOS
FONTE: O autor (2008)

3.5) Determinação do acúmulo do fluxo

O passo seguinte consiste em se determinar o acúmulo (ou contribuição) do fluxo da rede de drenagem. Em outras palavras, para cada célula, calcula-se qual foi a contribuição dos fluxos ascendentes. Para tal, a função "Flow Accumulation" é chamada a partir do ArcToolBox (fig. 93). Esta função calcula o somatório das contribuições dos fluxos provenientes das células vizinhas em relação a célula atual. Quanto maior for a contribuição, maior será a luminosidade atribuída a célula em questão.

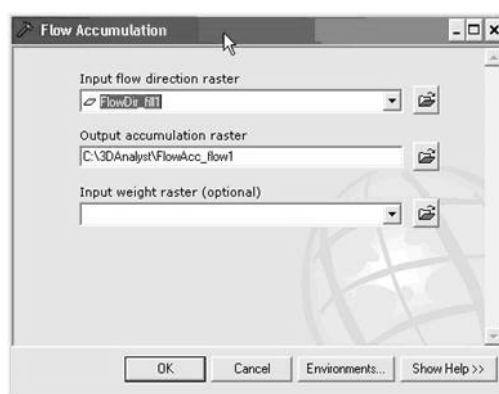


FIGURA 93 - JANELA DE DIÁLOGO DO "FLOW ACCUMULATION"
FONTE: O autor (2008)

Como resultado, uma nova *layer* é gerada no formato raster representando numa ordem crescente de luminosidade o acúmulo obtido (fig. 94). O tom de cor pode ser modificado manualmente (fig. 95).

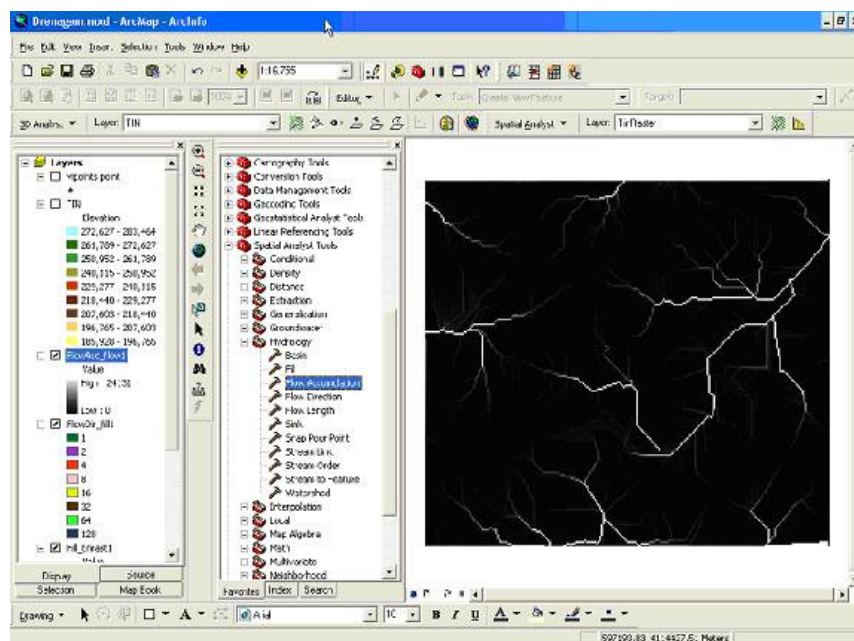


FIGURA 94 - LAYER REPRESENTANDO A CONTRIBUIÇÃO OBTIDA
FONTE: O autor (2008)

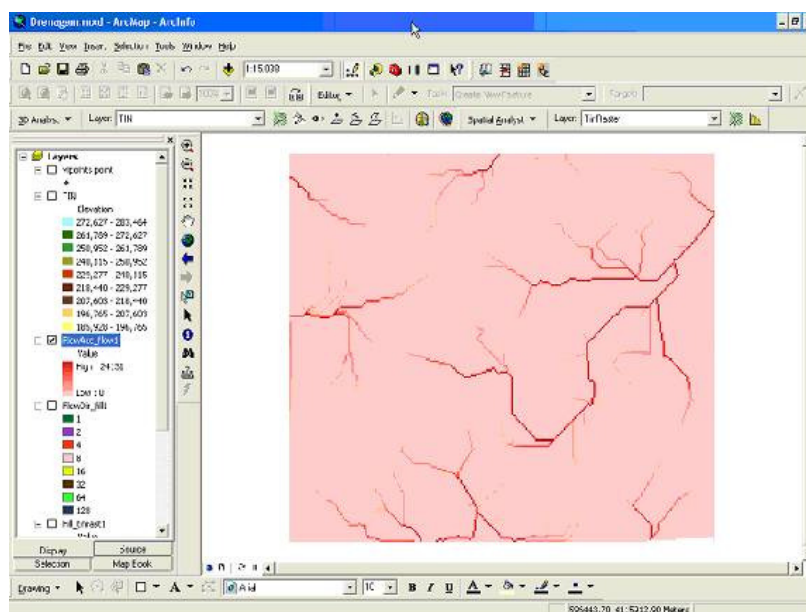


FIGURA 95 - LAYER MODIFICADA REPRESENTANDO A CONTRIBUIÇÃO OBTIDA
FONTE: O autor (2008)

Pode-se sobrepor as duas *layers* produzidas: o que representa a TIN e o da contribuição. Para melhor visualização, optou-se em dar um certo grau de transparência à *layer* da TIN resultando na figura 96.

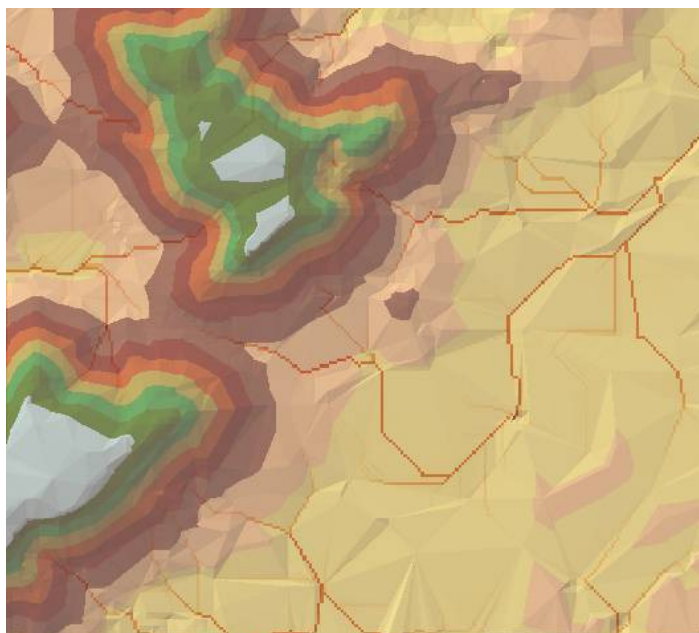


FIGURA 96 - SOBREPOSIÇÃO DE *LAYERS*
 FONTE: O autor (2008)

3.6) Vetorização da rede de drenagem

Até aqui, a rede de drenagem obtida apresenta-se na forma matricial. Observa-se que o tom de cor e a intensidade produzidas em cada célula determinam o grau de contribuição que células anteriores deram no fluxo descendente pelo terreno. Células que não apresentam contribuição são chamadas de "NODATA" no sentido de que não recebem valor algum. Para obter-se o arquivo vetorizado em polilinha, delimita-se a imagem matricial para um certo grau de contribuição das células e com este arquivo delimitado gera-se o arquivo do tipo "Shapefile feature class".

3.7) Delimitação da rede de drenagem

Para que a rede de drenagem possa ser vetorizada, pode-se delimitá-la mediante a utilização de funções de álgebra de mapas ou pela ferramenta **Con** por meio da chamada ao menu "Spatial Analyst Tool/Map Algebra/Single Output Map Algebra" (fig. 97). Neste diálogo, insere-se a expressão que realizará a delimitação. Duas expressões podem ser utilizadas que produzirão resultados semelhantes:

con (c:\Drenagem\flowacc > 100, 1)

ou ainda,

setnull (c:\Drenagem\flowacc < 100, 1)

As expressões acima produzirão uma saída onde "c:\Drenagem\flowacc" é o arquivo do fluxo acumulado obtido em passo anterior, "100" é o limite de contribuição de células e "1" é o valor que as células terão ao satisfazer a condição estabelecida resultando nas demais células o valor "NODATA". Em outras palavras, somente serão consideradas as contribuições superiores a 100 células. Células com valores menores de contribuição serão atribuídas o valor "NODATA".

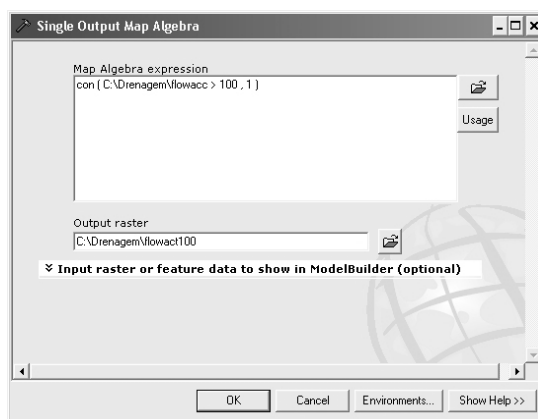


FIGURA 97 - DIÁLOGO PARA DELIMITAÇÃO E PRODUÇÃO DO ARQUIVO "STREAM"
FONTE: O autor (2008)

A imagem produzida toma a forma ilustrada pela figura 98.

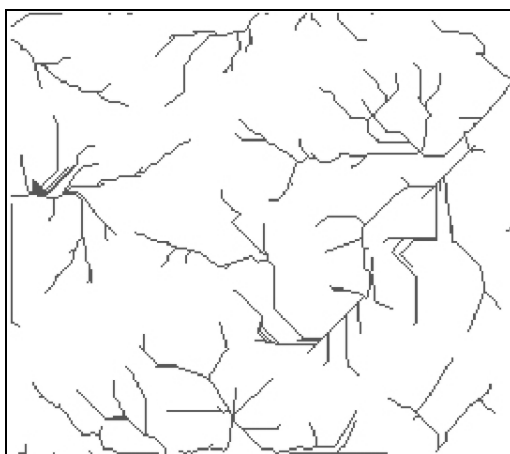


FIGURA 98 - IMAGEM OBTIDA DO ARQUIVO "STREAM" GERADO NO ARCGIS®
FONTE: O autor (2008)

3.8) Passagem da rede matricial delineada para vetorizada (shapefile)

Finalmente, recorre-se à ferramenta "Spatial Analyst Tools / Hydrology / Stream to Feature". A janela de diálogo (fig. 99) é apresentada:

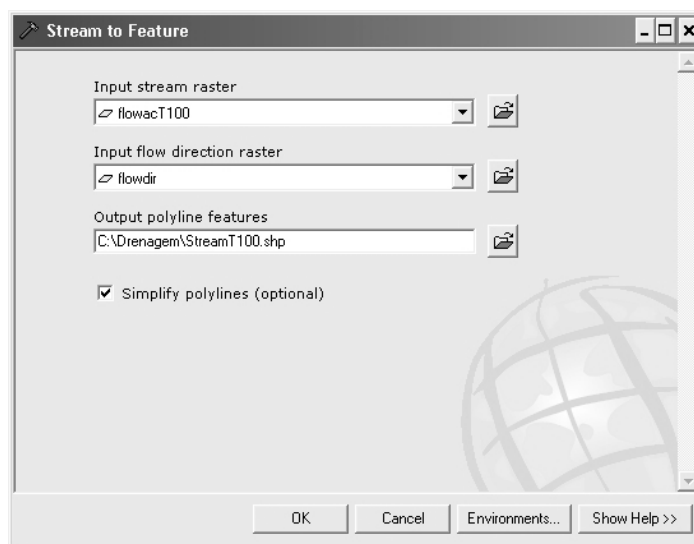


FIGURA 99 - DIÁLOGO DE PASSAGEM PARA ARQUIVO "FEATURE"
FONTE: O autor (2008)

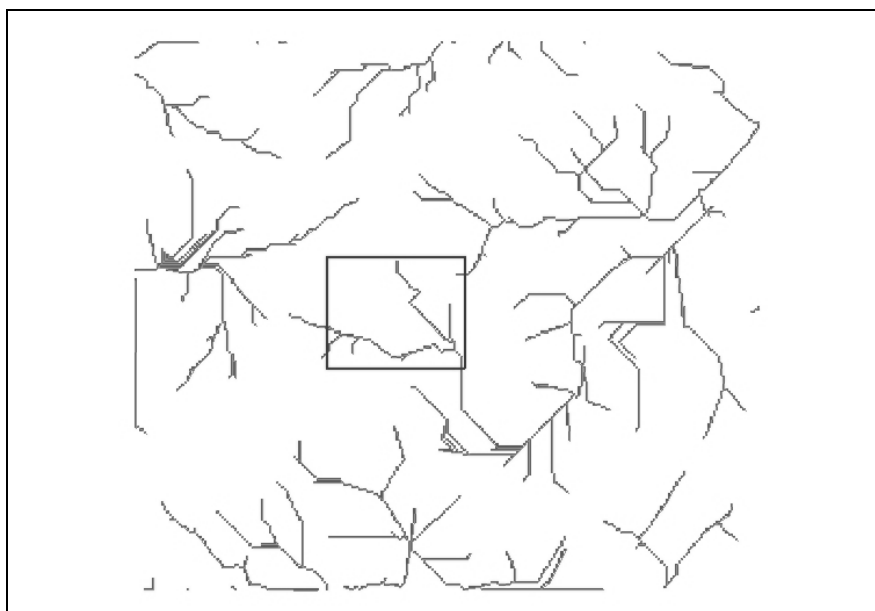


FIGURA 100 - IMAGEM OBTIDA VETORIZADA
FONTE: O autor (2008)

É possível ver um detalhe do resultado da vetorização (fig. 101), onde uma polilinha foi selecionada (em vermelho, de ARCID=136) com os valores dos seus atributos:

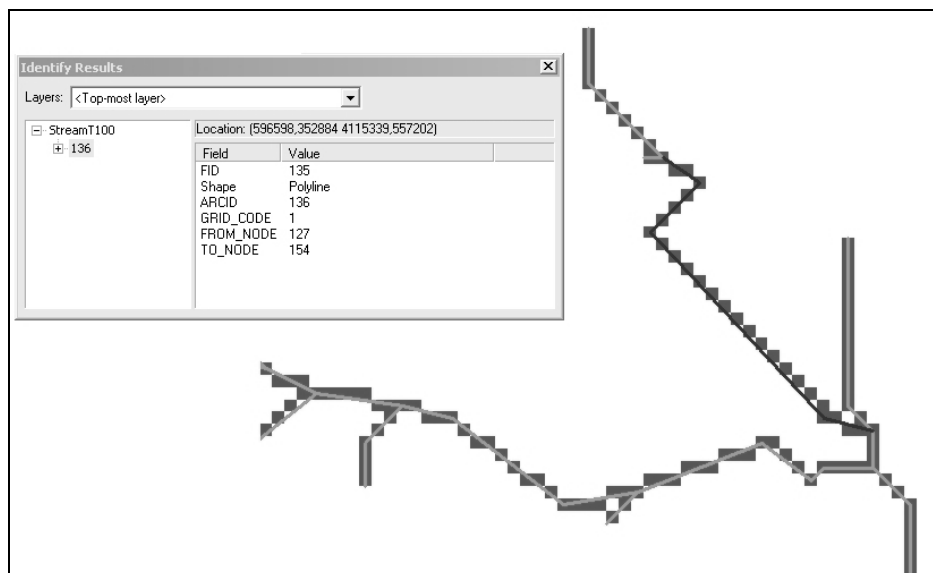


FIGURA 101 - RESULTADO DA VETORIZAÇÃO COM POLILINHA SELECIONADA
FONTE: O autor (2008)

Com ferramenta de edição é possível observar os nós e suas respectivas coordenadas conforme figura 102:

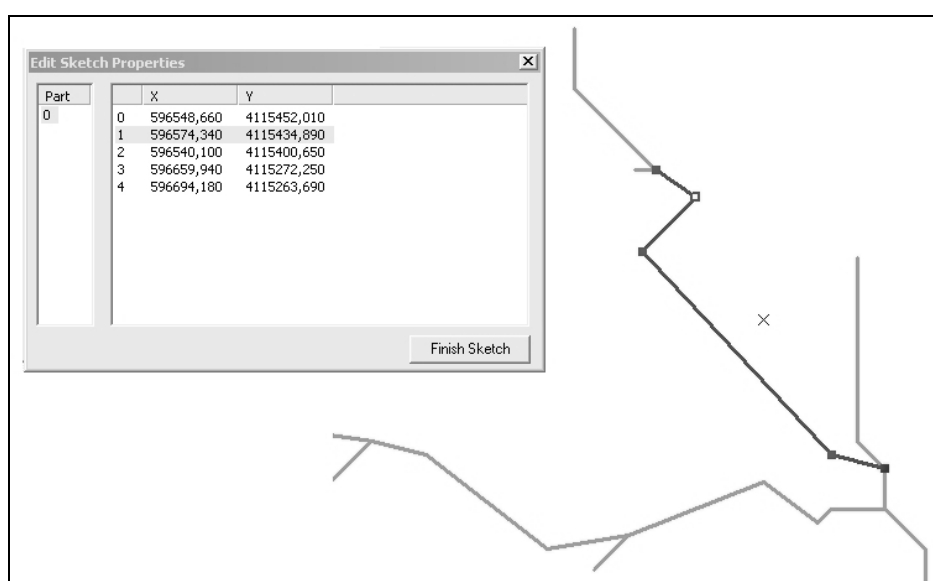


FIGURA 102 - VALORES DOS NÓS DA POLILINHA SELECIONADA
FONTE: O autor (2008)

APÊNDICE 3 – CONVERSÃO ENTRE FORMATOS DE ARQUIVOS DE DADOS

Para conversões recíprocas entre os formatos Texto e *shapefile*, localiza-se no ArcToolbox do ArcMap® a pasta “Samples”, o item “Data Management”, “Features” e seleciona-se uma das funções conforme o sentido de conversão requerido (fig. 103). Preenche-se em seguida os dados solicitados na janela de diálogo.

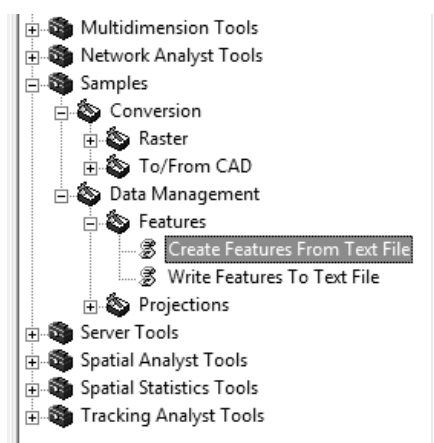


FIGURA 103 - MENU DO ARCTOOLBOX PARA EXPORTAÇÃO EM ARQUIVOS DE TEXTOS
FONTE: O autor (2008)

A figura 104 ilustra parte do conteúdo de um arquivo gerado na conversão de uma *feature* para arquivo texto.

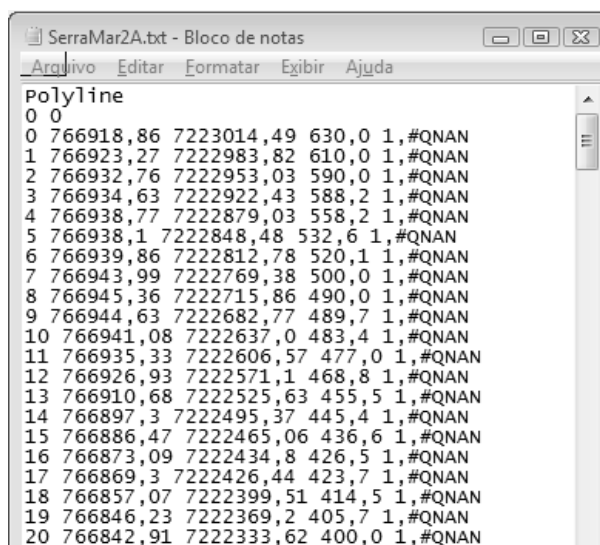


FIGURA 104 - EXEMPLO DE ARQUIVO DE DADOS EXPORTADO
FONTE: O autor (2008)